

UNIVERSITÉ DE LILLE
UFR3S-MÉDECINE
Année : 2025

**THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE**

**Bénéfices et risques de la course à pied avec chaussures minimalistes :
une revue narrative de la littérature**

Présentée et soutenue publiquement le 23 juin 2025 à 18h00
au pôle formation salle des thèses IV
par **Maxime PACAUX**

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Vincent TIFFREAU (PU-PH)

Assesseurs :

Monsieur le Professeur Carlos MAYNOU (PU-PH)

Monsieur le Docteur Luc DAUCHET (MCU-PH)

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur Vincent COUVREUR

AVERTISSEMENT

L'université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

TABLES DES MATIERES

I] INTRODUCTION	6
1. Contexte	6
2. Épidémiologie	7
I. Généralités	7
II. Blessures liées à la pratique de la course à pied (Running-related-injury)	8
a. Consensus et définition	9
b. Facteurs de risque des blessures liées à la course à pied (RRI)	10
c. Localisations les plus fréquentes	11
3. Problématique	12
4. Objectifs de l'étude	13
II] METHODE	15
1. Revue narrative de la littérature	15
I. Définition	15
II. Avantages	16
III. Limites	17
2. Stratégie de recherche documentaire	18
3. Sélections des articles	21
III] RESULTATS	22
1. Aspect biomécanique	22
I. Généralités	22
II. Différences biomécaniques entre les types de foulée	24
a. Points d'impact, répartition des forces	24
b. Taux de charge	25
c. Amortissement de la force de réaction du sol	25
d. Énergie potentielle élastique	27
e. Biomécanique posturale	27
f. Temps de contact au sol	29
g. Longueur de foulée et cadence	29
h. Economie de course	31
2. Blessures associées à la course à pied	32
I. Les plus fréquentes	32
II. Étiologies et facteurs de risque des blessures en course à pied	35
a. Syndrome de surutilisation (overuse injuries) ou stress répétitif	35

TABLES DES MATIERES

b. Mauvaise adaptation au type de chaussure.....	36
c. Faiblesse des muscles stabilisateurs du pied, de la hanche.....	38
d. Surface de course.....	38
e. Antécédents de blessure.....	39
f. Facteurs individuels (42,43,44,45).....	40
III. Types de foulée et pathologies.....	41
a. La fasciite plantaire.....	41
b. Tendinopathies achilléennes.....	42
c. Le syndrome de stress tibial médial (SSTM) ou périostite tibiale.....	43
d. Le syndrome fémoro-patellaire.....	44
3. Les chaussures minimalistes.....	46
I. Définition et principe.....	46
II. Effets biomécaniques.....	47
III. Impacts et controverses.....	47
IV. Indice minimaliste.....	48
4. Transition vers la foulée avant pied et chaussures minimalistes	48
IV] DISCUSSION.....	52
1. Interprétation globale : convergences et divergences des données .52	52
2. Contextualisation théorique.....	54
3. Qualités et limites méthodologiques.....	56
4. Implications des résultats.....	57
I. Théoriques.....	57
II. Pratiques.....	58
5. Pistes de recherches futures.....	59
I. Evaluer l'incidence des blessures en fonction des types de foulée : étude de cohorte prospective.....	59
II. Transition & blessures – Cohorte prospective comparative	61
III. Prévention secondaire du SFP – essai parallèle randomisé	62
V] CONCLUSION.....	62
Bibliographie.....	64
<u>Illustrations.....</u>	<u>72</u>
<u>Annexes - Biomécanique.....</u>	<u>76</u>
<u>Annexes – Pathologies et facteurs de risques.....</u>	<u>78</u>
<u>Annexes – Chaussures minimalistes et transition vers les MFW.....</u>	<u>82</u>

LISTE DES ABREVIATIONS :

BMI : BODY MASS INDEX

CRS : CHAUSSURES DE COURSE TRADITIONNELLES

DF : DUTY FACTOR

EPS : EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE

FFS : FOREFOOT STRIKE

FRS : FORCE DE REACTION DU SOL

FSP : FOOT STRIKE PATTERN

GR : GAIT RETRAINING : REEDUCATION A LA FOULEE

IC : INDICE DE CONFIANCE

IMC : INDICE DE MASSE MUSCULAIRE

IRM : IMAGERIE PAR RAISONNANCE MAGNETIQUE

MFS : MIDFOOT STRIKE

MFW : MINIMALIST FOOTWEAR : CHAUSSURES MINIMALISTES

MTSS (=SSTM) : SYNDROME DE STRESS TIBIAL MEDIAL

RE : RUNNING ECONOMY

RFS : REARFOOT STRIKE

RR : RISQUE RELATIF

RRI : RUNNING-RELATED-INJURY : BLESSURES DÛES A LA COURSE A PIED

SFP : SYNDROME FEMORO-PATELLAIRE

SMD : DIFFERENCE MOYENNE STANDARDISEE

VO₂ (mL/Kg/min) : CONSOMMATION D'OXYGENE POUR UN EFFOR CONSTANT

I] INTRODUCTION

1. Contexte

La course à pied est l'une des disciplines sportives les plus pratiquées dans le monde, appréciée à la fois pour sa simplicité d'accès, son impact favorable sur la condition physique et son potentiel préventif vis-à-vis de nombreuses pathologies chroniques. Toutefois, l'essor rapide du running ces dernières décennies s'est accompagné d'une augmentation des blessures musculosquelettiques, suscitant un intérêt accru pour l'optimisation de la foulée, la réduction du risque de traumatisme et l'amélioration des performances.

Parmi les approches explorées, la course à pied dite « minimaliste » a connu un engouement notable depuis les années 2010, popularisée par la diffusion de chaussures à faible amorti et la valorisation d'une technique de foulée initiée par l'avant-pied ou le médio-pied. Cette pratique s'inscrit dans l'idée que le pied, libéré de la contrainte d'une semelle épaisse, peut réaliser sa fonction biomécanique naturelle en s'adaptant mieux au sol et en répartissant différemment les forces d'impact. Les adeptes de cette technique y voient divers bénéfices, tels qu'une meilleure proprioception, un renforcement musculaire accru du pied et une réduction de certaines blessures, notamment au niveau du genou.

Il s'agit du même sport : le jogging, le footing, running, fond, demi-fond, course à pied libre ou en compétition. La course minimaliste ou avec chaussures minimalistes est tout ceci à la fois. Le sport reste le même mais la technique de foulée change pour une tendance aux gestes paraissant plus physiologiques. Les aspects technologiques modifiant la pratique sont réduits au maximum, d'où le terme minimaliste.

Cependant, la transition vers une foulée plus « naturelle » soulève plusieurs interrogations quant aux risques potentiels, particulièrement en cas de changement trop rapide ou mal encadré : sursollicitation des muscles du mollet, tendinopathies d'Achille, fractures de fatigue du métatarse, etc. De plus, l'efficacité de la course minimaliste en termes de performance ou de prévention des blessures reste controversée, faute de consensus scientifique clair et en raison d'une grande hétérogénéité méthodologique dans les études existantes.

2. Épidémiologie

1. Généralités

Selon l'Observatoire du Running 2024 de l'Union Sport & Cycle, environ 12,4 millions de Français, soit 25 % de la population, pratiquent la course à pied. Parmi eux, près de 8 millions sont des coureurs réguliers, c'est-à-dire courant au moins une fois par semaine. La répartition par sexe est quasi équilibrée, avec 49 % de femmes parmi les pratiquants. Notamment, 70 % des femmes qui courent ont commencé il y a moins de 5 ans, témoignant d'une féminisation récente de la discipline. (1)

Les motivations principales des coureurs sont le bien-être (59 %), le désir d'être bien dans leur corps (58 %) et l'évacuation du stress (50 %). Les aspects sociaux ou compétitifs sont moins souvent cités, avec seulement 6 % des coureurs cherchant à rencontrer de nouvelles personnes.

À l'échelle mondiale, la course à pied est également en plein essor. Par exemple, l'ultramarathonien français Serge Girard a parcouru 27 011 kilomètres en 365 jours, établissant un record du monde de course d'endurance.

En ce qui concerne l'équipement, environ 1 milliard de paires de chaussures de course sont vendues chaque année dans le monde, ce qui signifie qu'en moyenne, une personne sur huit achète une nouvelle paire de baskets chaque année. Le marché de la chaussure de course à pied est considérable. on peut imaginer la réaction des fabricants de chaussure « maximaliste » – conventionnelles si les chaussures minimaliste devenaient supérieurs en terme de performance et prévention des blessures.

II. Blessures liées à la pratique de la course à pied (Running-related-injury)

Les taux d'incidence des blessures liées à la course à pied varient considérablement selon les études, allant de 3,2 % à 84,9 %. Cette large variation peut s'expliquer par les différences dans les conceptions des études, les définitions des blessures, les caractéristiques des sujets et les périodes de suivi. (2)

Une étude a montré que 44,6 % des coureurs ont subi une blessure au cours de l'année précédente, les sites les plus courants étant le pied/la cheville (30,9 %) et le genou (22,2 %). (3)

a. Consensus et définition

Les blessures liées à la course à pied sont les RRI (Running-related-injuries). Un consensus les définissant via une méthode Delphi modifiée est parue en 2015 :

« Douleur musculosquelettique des membres inférieurs liée à la course (entraînement ou compétition), entraînant une réduction ou un arrêt de la course (distance, vitesse, durée ou fréquence) pendant au moins 7 jours ou 3 sessions d'entraînement consécutives, ou nécessitant une consultation auprès d'un professionnel de santé. » (2)

Dans l'étude de Yamato et al., la méthode delphi modifiée a réuni l'avis de 38 experts internationaux pour définir précisément ce qu'est une running-related injury (RRI), en tenant compte de leur expérience et des données scientifiques disponibles.

L'adoption de cette définition permet :

- De standardiser les critères de diagnostic des blessures liées à la course,
- D'améliorer la comparabilité entre les études épidémiologiques,
- De mieux cibler les stratégies de prévention et de prise en charge.

b. Facteurs de risque des blessures liées à la course à pied (RRI)

Les facteurs de risque identifiés de ces blessures sont :

- Un volume d'entraînement élevé : une augmentation rapide de la charge d'entraînement et une intensité excessive sont associées à un risque accru de blessures. Une revue systématique a identifié ces caractéristiques comme des facteurs de risque significatifs (5),
- Des antécédents de blessures : les coureurs ayant déjà subi une blessure sont plus susceptibles d'en subir une nouvelle. Une étude a montré que les coureurs récréatifs ayant des antécédents de blessures présentaient un risque accru de nouvelles blessures, en particulier si la blessure précédente était localisée au même endroit anatomique (6),
- Facteurs morphologiques et biomécaniques : des aspects tels que l'alignement des membres inférieurs, la force musculaire et la technique de course peuvent influencer le risque de blessure. Par exemple, une faiblesse des muscles de la hanche et du tronc peut entraîner une mauvaise mécanique de course, augmentant ainsi le risque de blessures (7),
- Facteurs liés au mode de vie et à la santé : des éléments tels que le manque de sommeil, le stress et une mauvaise alimentation peuvent compromettre la récupération et augmenter le risque de blessure. Une revue systématique a

souligné l'importance de ces facteurs dans le développement des blessures liées à la course (5),

- Utilisation de chaussures inappropriées : le port de chaussures de course avec des talons épais (drop élevé) peut altérer la perception du schéma de frappe du pied, augmentant ainsi le risque de blessure. Une étude a révélé que les coureurs portant ce type de chaussures étaient plus susceptibles de subir des blessures (8).

c. Localisations les plus fréquentes

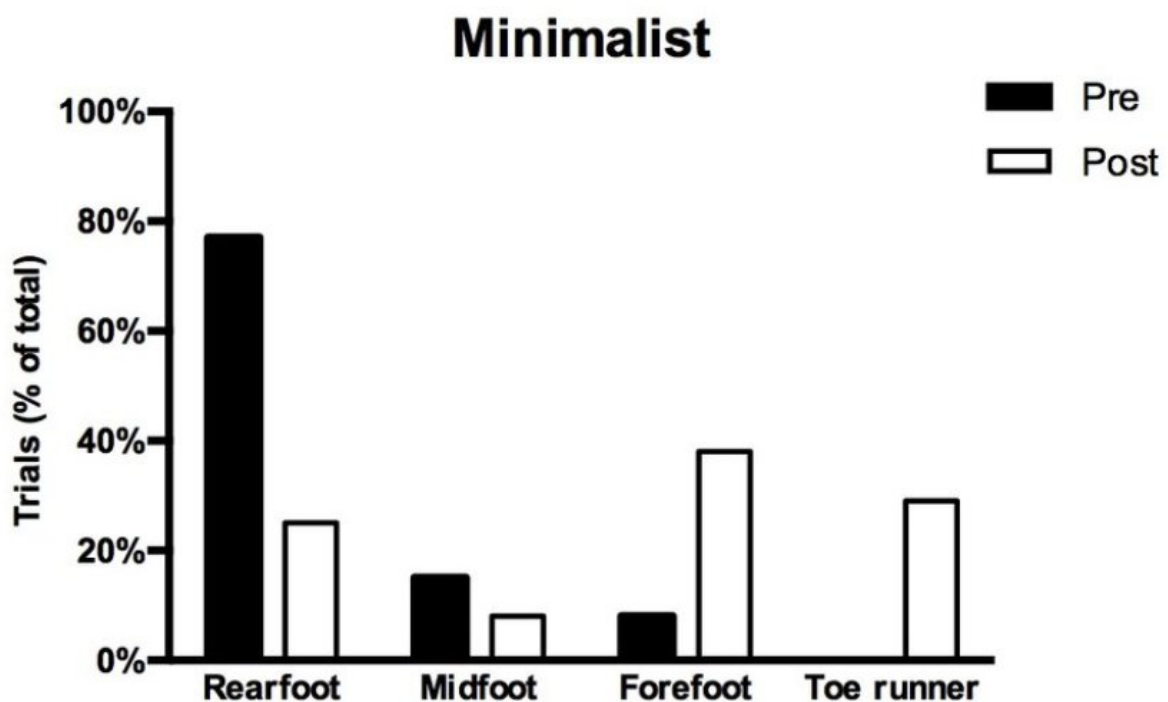
- Genou : le genou est souvent cité comme la zone la plus fréquemment blessée chez les coureurs. Une revue systématique a rapporté que le genou représentait environ 24,3 % des blessures des membres inférieurs liées à la course (9),
- Cheville et pied : 26% (10),
- Jambe (loge tibiale antérieure, tibia et mollet) : 16 % (10).

Si on discrimine selon le genre on peut dire rapidement que les hommes se blessent plus à la cheville-pied et à la jambe inférieure (respectivement 26% contre 19% et 21% contre 16%).

En revanche les femmes se blessent plus au genoux (40% contre 31%) (10).

3. Problématique

De fait, de nombreux travaux scientifiques se sont fait sur le type de foulée par l'avant du pied. La problématique se pose donc ainsi. Existe-t-il des bénéfices tangibles démontrés de façon scientifique à adopter une foulée avant-pied voire médio-pied, celles-ci encouragées par le port de chaussures minimalistes, plutôt qu'une foulée talonnière favorisée par les chaussures de running dites traditionnelles. Puisqu'on sait que la chaussure influence le pattern d'attaque au sol par le pied (Foot-Strike-Pattern = FSP). En effet, après un peu d'entraînement, les coureurs passant à la chaussure minimalistes vont adopter pour la plupart d'entre eux une foulée initiée par l'avant du pied voire médio-pied (11).



Ce diagramme en barre groupé issu de l'étude référencée numéro 11 illustre bien le passage de la foulée talon à une foulée du milieu à l'avant du pied. En noir un le

contingent de 80% de RFS passe à 20% après 7 semaines de course avec chaussures minimalistes.

4. Objectifs de l'étude

La course à pied minimaliste suscite depuis plusieurs années un intérêt croissant, tant chez les coureurs que dans la communauté scientifique. Présentée comme plus naturelle ou plus respectueuse de la biomécanique humaine, cette approche continue de faire débat quant à ses effets sur la performance et le risque de blessure.

Si plusieurs revues systématiques ont déjà exploré divers aspects de la course minimaliste, leurs conclusions restent souvent limitées ou contradictoires. C'est pourquoi nous avons opté pour une revue narrative : cette approche plus souple permet de synthétiser les connaissances disponibles, d'examiner à la fois les bénéfices et les risques associés à cette pratique, et de les replacer dans un cadre pratique et clinique élargi.

Dans cette revue, nous présenterons d'abord les principes biomécaniques fondamentaux de la foulée minimaliste, puis nous discuterons des mécanismes d'apparition des blessures. Nous dresserons ensuite un état des lieux des études cliniques et observationnelles, avant d'aborder les pistes de prévention, de prise en charge et d'accompagnement des coureurs souhaitant s'initier ou perfectionner leur pratique de la foulée avant-médio-pied.

En plus de répondre à la problématique suscitée, cette revue vise également à nourrir la réflexion clinique sur l'intégration de la course minimaliste dans le suivi des patients.

Notre objectif est d'offrir des repères concrets aux professionnels de santé, en particulier aux médecins généralistes, afin qu'ils puissent conseiller au mieux leurs patients dans une démarche de course à pied à la fois sécuritaire et bénéfique pour leur santé globale.

Afin de rendre clair ce travail et éliminer toutes potentielles confusions, on admettra que les coureurs utilisant des chaussures minimalistes courent en foulée avant-pied voire médio-pied (Fore-foot-strike FFS – mid-foot-strike MFS). Même si ce n'est pas une règle formelle, ce type de chaussure favorise une foulée par l'avant pied et l'utilisation de ces chaussures en foulée talonnière (Rear-foot-strike RFS) serait assez contre intuitive après passage aux chaussures minimalistes.

II] METHODE

1. Revue narrative de la littérature

I. Définition

Une revue narrative (ou revue de littérature narrative) est une approche qualitative de synthèse des connaissances scientifiques sur un sujet donné. Contrairement à la revue systématique, elle ne suit pas un protocole de sélection et d'analyse aussi rigoureux et standardisé. Cette flexibilité méthodologique permet d'intégrer un large éventail de publications, incluant des études cliniques, essais contrôlés, études observationnelles, articles de synthèse, voire des textes théoriques ou des publications non indexées. L'objectif principal est de proposer une vision globale, critique et contextualisée de la littérature existante, en mettant en lumière les principales tendances, les points de convergence et de divergence, ainsi que les lacunes ou les pistes de recherche futures. Bien que moins rigoureuse sur le plan méthodologique, la revue narrative conserve une valeur scientifique lorsqu'elle est conduite de manière transparente et argumentée.

II. Avantages

- Flexibilité dans la sélection des sources et la structuration de l'information,
- Permet d'adapter la méthode à la complexité du sujet traité et à la diversité des sources disponibles,
- Mise en contexte élargi, permettant d'inclure des points de vue divers (physiologique, clinique, méthodologique),
- Favorise une compréhension globale et interdisciplinaire du sujet,
- Approche pédagogique : permet de faire ressortir des pistes de réflexion ou d'innovation dans un domaine où les résultats sont parfois épars,
- Sert de support de vulgarisation ou de formation, notamment pour les étudiants ou les non-spécialistes,
- Utile dans les domaines émergents ou peu explorés. La course est un domaine émergent surtout en ce qui concerne la foulée avant-pied. Des milliers de papier sortent depuis les années 2010, la narration peut avoir un effet structurant, rassembler et relier des éléments afin peut être d'offrir des opportunités de recherches futures,

- La revue narrative peut ouvrir la voie à des recherches futures en structurant un champ encore peu balisé,
- Permet l'intégration de données hétérogènes,
- Adaptée lorsque les études disponibles sont trop différentes (méthodes, échantillons, objectifs) pour être comparées quantitativement,
- Adaptabilité aux besoins du lecteur : en effet, la structure et rédaction de notre revue pourra être faite afin de répondre à des attentes spécifiques, soit en fait à un type de lecteur. Contrairement à une revue systématique qui est toujours standardisée. Par exemple, pour un clinicien, l'auteur peut insister sur les implications pratiques des résultats. Ou encore pour un lecteur non spécialisé, elle peut offrir une facilitation d'accès à du contenu complexe,
- L'auteur peut orienter la synthèse en fonction d'un objectif précis : mise à jour des connaissances, clarification d'un concept, exploration critique, etc.

III. Limites

- Absence de protocole systématique : sélection plus flexible et subjective, cela entraîne un biais de sélection,
- Hétérogénéité des études incluses : les populations, les méthodologies, les critères d'évaluations, et les définitions sont variées,

- Qualités variables des sources : afin d'émettre des hypothèses, on a pu inclure des articles dont les échantillons sont restreints et les biais relativement élevés,
- Non exhaustivité potentielle : malgré les efforts de recherche, vu le nombre très élevé de recherche sur la course à pied, il est possible que certains travaux pertinents n'aient pas été inclus.

2. Stratégie de recherche documentaire

La recherche documentaire a été menée principalement dans les bases de données classique : PUBMED, SPORTNDOC, COCHRANE et GOOGLESCHOLAR.

Au niveau de la temporalité, j'ai choisi de débiter la recherche documentaire à partir de la sortie de l'article qui a tout changé dans le monde de la course à pied. Celui du Docteur Daniel Lieberman publié dans la revue NATURE en 2010 sous le nom de :

Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners

Cet article est sorti à la suite d'un livre au succès international traduit en plus de 30 langues de McDougall : Born To Run. En effet ce livre a délivré une histoire sur la course des plus incroyable par rapport à ce que l'on vivait en occident moderne avec nos chaussures modernes amorties. Les Tarahumaras, un peuple méconnu d'Amérique centrale nous sont présentés comme nés pour courir, des dizaines voire des centaines de kilomètre sans presque jamais se blesser. Ceux-ci courent bien sûr

à pied nu ou avec de modestes sandales à semelles fines. C'est enfin une critique puissante sur l'industrie des chaussures de sport actuelles.

Ce sont ces deux « œuvres majeures », soit un livre documentaire et une étude scientifique sur la biomécanique de course bien menée qui ont bouleversé le monde du running. Le paradigme de l'amorti de la foulée par le talon se trouve fortement contesté et depuis lors des centaines de recherches sur cette nouvelle façon de courir voient le jour.

On peut dire qu'avant la publication de Liebermann ***Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners*** et le roman d'aventure / essai ***Born to run***, le paradigme dominant était :

Les chaussures de course, dotées d'un amorti important, d'un contrôle de la pronation et d'une structure de soutien, protègent les coureurs contre les blessures en corrigeant ou en atténuant les contraintes mécaniques de la course à pied.

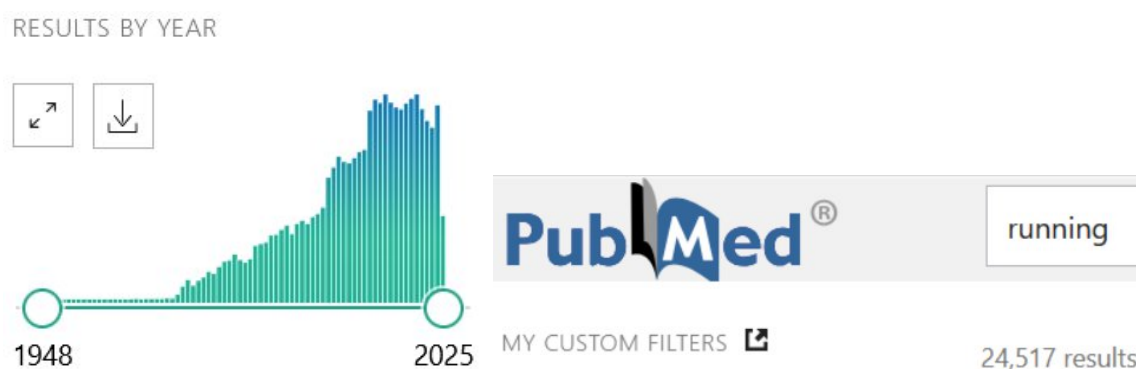
Puis on est passé à : Le corps humain est naturellement adapté à la course à pied, sans besoin de correction externe. Les chaussures modernes, en modifiant la biomécanique (notamment en favorisant l'attaque talon), pourraient être une cause indirecte de blessures.

Ces deux assertions que j'appelle « paradigmes » reflètent une synthèse de la pensée dominante sur la course à pied à différentes époques, en lien étroit avec l'évolution des connaissances scientifiques, des pratiques techniques et de l'innovation technologique dans le

Le paradigme traditionnel s'est construit à une époque où l'on croyait que les blessures pouvaient être prévenues par des interventions mécaniques via les chaussures. À l'inverse, le paradigme émergent, influencé par les travaux scientifiques de Lieberman

et le succès populaire de Born to Run, repose sur l'idée que le corps humain est naturellement apte à courir, et que les technologies modernes peuvent parfois interférer négativement avec cette capacité.

Sur Pubmed, avec l'unique mot clé : RUNNIG, on obtient environ 25000 résultats.



Graphique du nombre d'article par an par mot clef (running) sur PUBMED. Cela montre bien l'intérêt que suscite la course à pied au niveau de la recherche. On observe un net bond à partir de l'année 2011 suite à la parution des 2 œuvres suscitées. (2024 : 992 publications ; 2020 : 1048 publications ; 2011 : 965 publications ; de 2003 à 2010 environ 700 publications/an)

De ce graphique, on peut calculer une augmentation de 43% par an de la recherche sur la course à pied et notamment la course à pied nu ou minimaliste puisque c'est elle qui est mise en avant par Lieberman et MacDougall.

L'objet de ce travail est de présenter les bénéfices et risques de courir avec des chaussures minimalistes notamment car 90% des coureurs utilisent un pattern d'attaque talon alors qu'on sait que les meilleurs coureurs du monde ne l'utilisent pas.

J'ai donc fait une partie sur la biomécanique du corps en fonction des foulées avant ou arrière pied, une partie sur les blessures et leurs facteurs de risque puis une sur les chaussures minimalistes et enfin la transition entre les deux types de foulées.

J'ai donc utilisé des mots clés différents pour chaque partie :

- Biomechanic + running + (MINIMALIST or forefoot pattern or barefoot),
- Injury + running + (pattern or barefoot or forefoot),
- Minimalist shoe + running.

3. Sélections des articles

Dans le cadre de cette revue narrative de la littérature, un grand nombre d'articles ont été inclus en complément des revues systématiques existantes. Le choix s'est porté en priorité sur des études dont les résultats allaient dans le sens des conclusions des revues systématiques, afin d'appuyer la cohérence des tendances observées. Cette approche permet de valider, par un corpus élargi, les relations identifiées entre les variables étudiées, tout en tenant compte de la diversité des contextes, des échantillons et des méthodologies. Elle contribue également à illustrer de manière plus nuancée et détaillée certains mécanismes ou hypothèses déjà soutenus par des données de niveau élevé. En cohérence avec la visée exploratoire et intégrative d'une revue narrative, cette sélection vise donc à appuyer les consensus scientifiques actuels tout en en proposant une lecture actualisée et contextualisée.

La population des études incluses est quasi-exclusivement composée d'adultes sauf concernant une revue de 2025 sur les coureurs et blessures chez l'adolescent.

Enfin, l'approche narrative de cette revue vise à fournir aux professionnels de santé une vision globale et surtout mettre en perspective les principales données disponibles sur la course à pied avec chaussures minimalistes.

Ils devront donc être interprétés avec ces limites en tête. Néanmoins la qualité narrative de notre revue nous offre un diaporama assez exhaustif des connaissances sur le sujet de la course à pied minimaliste ou les études sont nombreuses et hétérogènes.

Les articles ayant le plus contribué à cette revue narrative seront présentés en annexe 1, 2 et 3, respectivement pour la partie biomécanique, la partie blessure et facteur de risque et enfin la partie sur la transition vers la foulée avant pied avec les chaussures minimalistes.

III] RESULTATS

1. Aspect biomécanique

I. Généralités

Quelque soit la foulée que le coureur adopte on peut généraliser le cycle de course en 4 phases :

- Phase d'amortissement : débute lors du contact initial avec le sol, la plupart des coureurs initient la foulée par le talon (RFS), les autres par l'avant-pied (FFS) ou le milieu de pied (MFS). Le type d'attaque, la position du coureur et la

distance point d'impact-centre de gravité va influencer la répartition de la force de réaction du sol (FRS) dans le corps,

- Phase de soutien : entre l'amortissement et la poussée, la FRS est à son maximum, les muscles et tendons sont étirés. La jambe emmagasine la force de freinage qui sera nécessaire à la poussée. Le centre de gravité est au plus bas,
- Phase de poussée : extension de la hanche et du genou, ils se tendent. La cheville effectue une flexion plantaire et génère la propulsion. Lorsque le pied quitte le sol, la hanche et le genou sont en extension maximale pour guider le corps vers l'avant. La cheville est évidemment en flexion plantaire maximale également ou extension,
- Suspension : le corps a quitté le sol, la jambe passe devant le centre de gravité afin de préparer un nouvel appui.

On distingue 3 forces quand le pied touche le sol :

- La force de réaction du sol (FRS) : c'est la plus importante. Selon la 3^e Loi de NEWTON : à toute action correspond une réaction opposée et égale. Elle est donc dirigée vers le haut en opposition au poids et en arrière car le corps est en mouvement vers l'avant. Elle est de 2 à 3 fois supérieure au poids à l'impact,

- Force de frottement : c'est la composante horizontale de la FRS, elle est parallèle au sol. Elle dépend du coefficient de frottement entre la chaussure et le sol. Elle est orientée selon le mouvement donc en avant lors de la propulsion et vers l'arrière lors du freinage,
- Le poids du corps : $P = m \times g$, lié à la masse du corps. C'est la force gravitationnelle, elle est dirigée vers le bas.

II. Différences biomécaniques entre les types de foulée

a. Points d'impact, répartition des forces

Une foulée avant-pied (FFS) implique un contact initial avec l'avant du pied, suivi d'une stabilisation où le talon peut ou non toucher le sol plus tard dans la phase d'appui. La force de réaction du sol est plus répartie sur l'avant-pied et les métatarsiens, réduisant le pic d'impact initial observé en attaque talon. La charge biomécanique est transférée vers la cheville et le tendon d'Achille, augmentant la sollicitation des structures du pied et du mollet.

Lors d'une attaque talon (RFS), le premier contact au sol se fait avec le talon, ce qui génère un pic d'impact initial plus marqué en raison de l'absence de flexion plantaire du pied à l'atterrissage. La FRS est plus verticale et passe derrière la cheville, elle réduit la charge sur le triceps sural et le tendon d'Achille pour l'augmenter sur le muscle tibial antérieur. La force de réaction verticale du sol est plus importante au niveau du talon et la dissipation de l'énergie se fait principalement par l'amorti de la chaussure et l'extension du genou.

Une étude comparative a montré que les coureurs attaquant le sol avec le talon (rear-foot-strike) présentent des pics d'impact plus élevés que ceux utilisant une attaque avant-pied (forefoot-strike) (12).

b. Taux de charge

Le taux de charge est une mesure de la rapidité avec laquelle la force de réaction du sol augmente juste après que le pied touche le sol pendant la course. Un taux de charge élevé signifie que la force soumise au corps s'intensifie très rapidement ce qui augmente les contraintes tissulaires. Plusieurs études démontrent que la course à pied nu ou avec chaussures minimalistes ont des taux de charges bien plus progressifs que la course RFS (13).

c. Amortissement de la force de réaction du sol

L'amortissement de la force de réaction du sol (FRS) varie significativement selon le type de foulée adopté lors de la course. En foulée talon, le contact initial avec le sol engendre un pic transitoire de force verticale plus important, transmis directement au squelette, ce qui peut augmenter le risque de blessures de surutilisation, notamment au niveau du genou ou du tibia (14). Cette foulée mobilise principalement les muscles quadriceps, le tibial antérieur et le grand fessier, en relation avec les articulations talocrurale (cheville), fémoro-tibiale (genou) et coxo-fémorale (hanche), pour absorber l'impact initial.

À l'inverse, la foulée avant-pied (forefoot-strike) permet une meilleure absorption mécanique de la FRS grâce à une plus grande implication des muscles triceps sural (mollet), ischio-jambiers, muscles intrinsèques du pied et également du grand fessier, en synergie avec les articulations métatarso-phalangienne, subtalaire, talocrurale et coxo-fémorale. Cette stratégie biomécanique favorise une absorption plus active de la charge via une phase d'amortissement musculaire prolongée, réduisant ainsi l'intensité du choc initial (15,16). Ainsi, le type de foulée détermine non seulement le profil de sollicitation articulaire et musculaire, mais aussi la manière dont les contraintes mécaniques sont distribuées dans le membre inférieur.

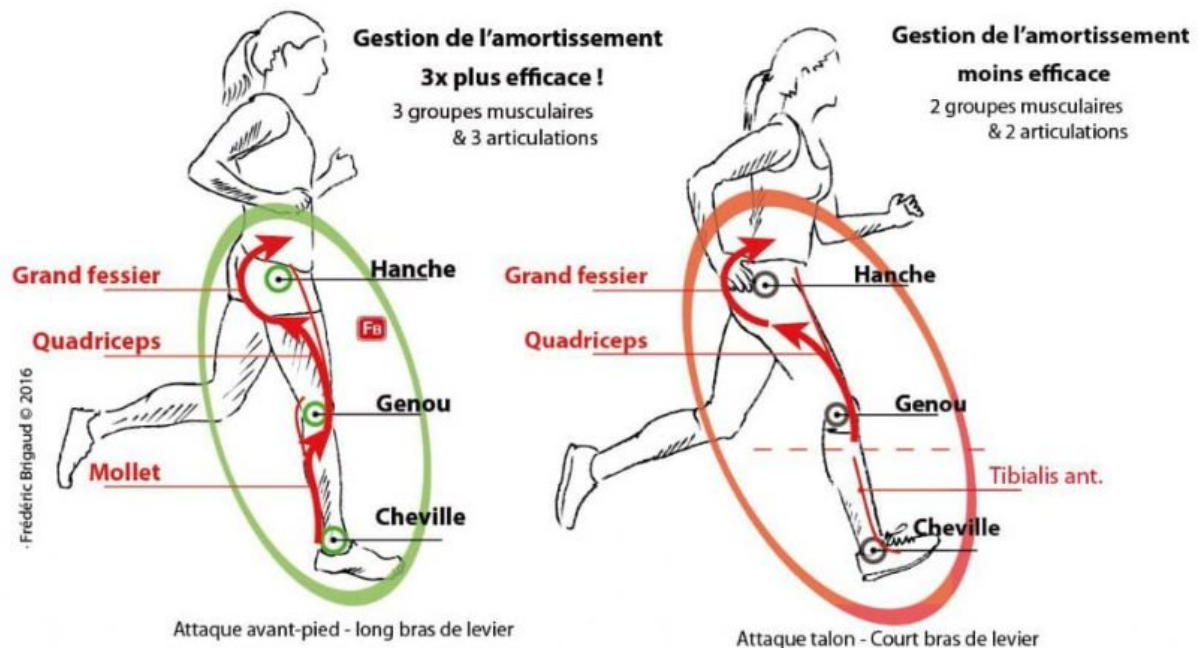


Schéma issu du Livre de Frédéric BRIGAUD illustrant les axes d'amortissement de la FRS en fonction de l'attaque avant-pied ou talon.

d. Énergie potentielle élastique

On sait que les tissus, via leur propriété élastique sont capables de restituer de l'énergie :

- Les muscles, lors d'une contraction excentrique peuvent emmagasiner de l'énergie élastique directement lors de la phase de contraction concentrique qui suit. En course ce phénomène ne se produit qu'en foulée avant-pied avec le triceps sural (17),
- Le fascia plantaire : sous le pied, il s'étire via l'affaissement des arches longitudinale et transversale, il agit en quelque sorte tel un ressort et restitue de l'énergie élastique en phase de propulsion. Courir avec des chaussures minimalistes ou à pied nu favorise ce phénomène à l'opposé des semelles rigides des chaussures traditionnelles qui limitent l'affaissement de la voûte plantaire et son étirement (18, 19).

e. Biomécanique posturale

La posture du coureur varie sensiblement selon qu'il adopte une foulée talon ou une foulée avant-pied, ce qui a des conséquences directes sur la biomécanique du mouvement. En foulée talon, le tronc est généralement plus redressé, le centre de gravité est légèrement en arrière, et la jambe s'avance davantage, créant un angle d'attaque plus ouvert au moment du contact avec le sol (17). Ce type de foulée génère souvent un freinage initial plus marqué, associé à un pic de force de réaction verticale

plus abrupt (13). À l'inverse, la foulée avant-pied est caractérisée par une inclinaison légère du tronc vers l'avant, un appui plus proche du centre de masse, et une flexion accrue de la hanche, du genou et de la cheville à l'atterrissage. Ce schéma postural favorise une transition plus fluide et élastique entre absorption et propulsion, réduisant l'amplitude des forces de freinage (16). De plus, la foulée avant-pied augmente l'implication active des chaînes postérieures (notamment le triceps sural, les ischio-jambiers et le grand fessier), et sollicite davantage les structures tendineuses, notamment le tendon d'Achille, pour le stockage et la restitution d'énergie élastique (15,18). Ces ajustements posturaux influencent directement la répartition des contraintes mécaniques, l'économie de mouvement, et les zones à risque de surcharge.

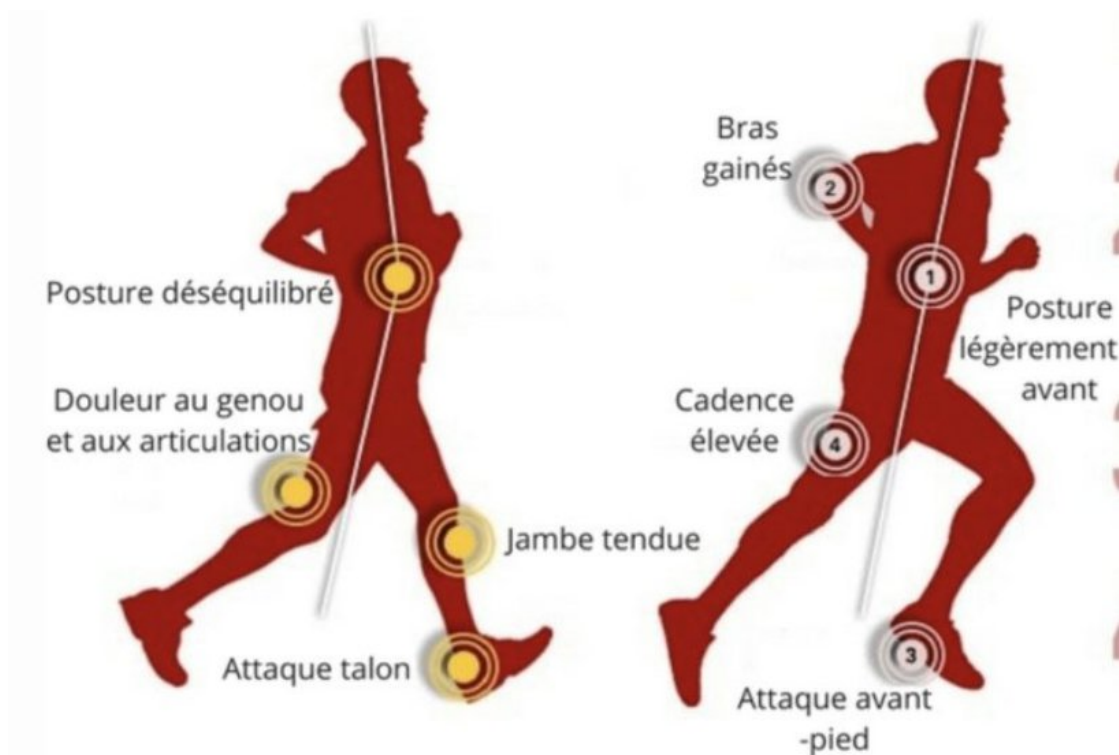


Schéma issu de l'ouvrage de Frédéric BRAIGAUD paru en 2015 illustrant les postures différentes en fonction des attaques talon à gauche et avant-pied à droite.

f. Temps de contact au sol

Équation du Duty Factor (DF)

$$\text{Duty Factor} = \frac{\text{temps de contact au sol}}{\text{temps de contact au sol} + \text{temps de vol}} \times 100$$

Le DF correspond à la proportion du cycle de course durant laquelle le pied est en contact avec le sol. Pendant la marche le DF est toujours supérieur à 50%, en course toujours inférieur à 50%.

Chez un coureur performant le DF sera faible, d'ailleurs une étude récente montre qu'au premier tour de course le temps de contact au sol est significativement plus court que lors du dernier, cela refléterait la fatigue progressive chez les coureurs (20).

Cette même étude effectuée sur 181 coureurs redonne aussi des temps de contact au sol plus faible chez les coureurs FFS et MFS (20).

g. Longueur de foulée et cadence

La cadence (nombre de pas par minute) et la longueur de foulée sont deux paramètres clés influencés par le schéma d'attaque du pied lors de la course à pied. Les coureurs adoptant une attaque avant-pied (forefoot strike) ont tendance à présenter une cadence plus élevée et une foulée plus courte, tandis que ceux utilisant une attaque talon (rearfoot strike) affichent généralement une cadence plus basse et une foulée plus longue (21).

Une étude récente montre que ces deux paramètres sont liés, il faut donc être conscient que dissocier ces 2 paramètres n'est donc pas forcément évident pour tous, le clinicien doit en être conscient (22).

Réduire la longueur de la foulée influe sur le type d'attaque, elle peut être utilisée pour changer l'attaque du sol. Réduire la longueur de la foulée implique d'aller vers un pattern d'attaque avant pied. Ainsi réduire la longueur de la foulée combinée à une augmentation de cadence permet de maintenir la même vitesse en diminuant les forces d'impact (22).

Une étude sur les jeux olympiques de Tokyo révèle que les coureurs élites ont majoritairement une attaque médio-pied puis avant-pied et une cadence beaucoup plus élevée que les coureurs récréatifs (23).

Courir pied nu ou avec des chaussures minimalistes amène souvent les coureurs RFS traditionnels à réduire leur foulée et à adopter une attaque avant-pied voire médio-pied (24).

Par ailleurs, une recherche a démontré que la modification du schéma d'attaque du pied et l'augmentation de la cadence peuvent influencer les paramètres biomécaniques de la course. Ces ajustements peuvent contribuer à une meilleure absorption des forces d'impact et à une propulsion plus efficace (25).

En résumé, l'adoption d'une attaque avant-pied ou médio-pied, associée à une cadence élevée et à une foulée plus courte, semble favoriser une course plus efficace et potentiellement moins traumatisante pour le corps.

h. Economie de course

La méta-analyse de 2016 conclut à une légère amélioration de l'économie de course en faveur de la foulée avant pied, mais ne trouve rien de significatif en comparant la course pied nu et chaussée de façon minimaliste. En somme, la foulée avant-pied fait gagner 1 à 3 % de la consommation d'oxygène. Cette étude évoque comme origine de ce gain la masse moindre des chaussures, les changements biomécaniques avec les systèmes de restitution d'énergie élastique et les paramètres spatio-temporelles modifiés en FFS (foulée plus courte, cadence élevée réduirait le temps de contact au sol) (26).

Une étude de 2013 qui n'avait conclu à aucune amélioration de la VO₂max a révélé en revanche une modification du profil énergétique. Courir avant-pied ne consomme pas moins d'énergie mais augmente l'utilisation des lipides par rapport aux glucides. Les coureurs épargneraient leurs réserves de glycogène, ce qui serait intéressant pour des courses longues (27).

Une étude portant sur l'apprentissage de la foulée avant-pied avec chaussure minimaliste ne modifie pas l'économie de course après 8 semaines d'entraînement. Cependant l'étude montre une diminution de 2.7% de la consommation d'oxygène avec les chaussures minimalistes, ceci serait dû à la masse plus faible des chaussures. A noter qu'à la suite de l'intervention, une tendance au pattern avant-pied avec augmentation de la cadence de course est observée (28).

En 2018, une étude de même envergure a également voulu étudier l'économie de course après 8 semaines de portage de chaussures minimaliste. Le groupe minimaliste a retrouvé une amélioration légère à modérée de son économie de course

après 8 semaines. Les groupes étant petits, pas de significativité statistique retrouvée avec $p > 0.05$. Même si les blessures n'étaient pas l'objectif principal, le groupe minimaliste ne comptait qu'un seul abandon (29).

Une méta-analyse étudiant les chaussures montrent évidemment que plus la chaussure est lourde plus l'économie de course se dégrade. Les chaussures légères (<440g) ou à pied nus offrent un avantage modeste mais significatif sur la RE (running Economy). En revanche la comparaison pieds nus vs. chaussures légères ne montre pas de différence significative. Aussi les chaussures minimalistes offrent un léger avantage sur les chaussures standards (SMD = 0.29) (30).

Une deuxième méta-analyse de 2025 incluant 26 essais contrôlés randomisés vient reconfirmer le bénéfice apportait sur la RE par les chaussures de course minimalistes (31).

2. Blessures associées à la course à pied

I. Les plus fréquentes

- Fasciite plantaire : inflammation du fascia plantaire, souvent causée par une surcharge excessive, une faible force des muscles intrinsèques du pied ou une sollicitation excessive du talon. Douleurs sous-talonnières irradiant en avant. Radiographie nécessaire afin d'éliminer une épine calcanéenne (illustration 1),
- Tendinopathie d'Achille : survient principalement chez les coureurs augmentant trop rapidement leur volume d'entraînement ou ceux effectuant une transition

brutale vers la foulée avant-pied ou pieds nus. Il s'agit en général de tendinite corporeale, les enthésopathies sont généralement observées chez des patients plus âgés en surpoids (illustration 2),

- Syndrome fémoro-patellaire (syndrome rotulien) : douleurs antérieures plutôt diffuses. Lié à une augmentation du stress sur l'articulation du genou, souvent exacerbée par une attaque talon avec un genou en extension excessive à l'atterrissage,
- Tendinite rotulienne : douleurs infra-patellaire au niveau du tendon rotulien. Elle est due à l'exercice intense notamment sur surface dure,
- Fractures de fatigue ou de stress : touchent principalement les métatarsiens II III et IV ou le tibia. Les impacts répétés sans repos suffisant en sont la cause. Les pieds plats sont un facteur de risque. Les radiographies standards peuvent être normales au début, œdème cutané à la localisation de la fracture,
- Fracture de stress de l'os naviculaire : pathologie des sportifs qui font du saut ou des coureurs de moyenne distance. Guérison rendue difficile par une mauvaise vascularisation du centre de l'os. Douleurs diffuses au dos du pied et exquises au point N (apex naviculaire). Immobilisation 6-8 semaines nécessaires avec reprise du sport extrêmement prudente (illustration 7),

- Syndrome de la bandelette ilio-tibiale (syndrome de l'essuie-glace) : survient fréquemment en raison d'une surcharge mécanique sur le côté latéral du genou. Il est souvent lié à des déséquilibres musculaires ou une mauvaise technique de course (illustration 3),
- Pubalgie : c'est un syndrome douloureux complexe localisé au niveau du pubis. Selon sa nature il peut concerner tendons, muscles et ligaments du tronc, du bassin et ou de la cuisse (classification de cette pathologie en illustration 4),
- Périostite tibiale : douleurs inflammatoires. Cela est due souvent à des intensifications d'entraînement. On considère que c'est une pathologie de surcharge, due à des microtraumatismes répétés. La douleur est présente surtout en début d'activité physique au contact avec le talon puis s'atténue. Elle cède avec repos. Le facteur de risque essentiel est le pied creux que l'on corrige avec des semelles orthopédiques,
- Déchirure musculaire (classification en illustration 5) : de la simple « élongation » à la rupture musculo-tendineuse complète. C'est souvent dû à un manque d'échauffement et/ou un effort trop important par rapport à ce que le muscle peut supporter. Sa localisation par la proximité avec l'os et la quantité de myofibrille rompue font la gravité et augmentent le temps de rééducation,
- Syndrome des loges : augmentation de la pression dans un compartiment musculaire. Il peut être chronique par élévation de la masse musculaire dans le

sport intense ou aigu (traumatisme, rupture veine, artérielle...). En aigu, c'est une urgence médicale. En situation chronique la douleur intéresse le compartiment musculaire comprimé, sensation de tension extrême avec fourmillements, picotements, peau tendue, muscles durs et gonflés. Le traitement est chirurgical en situation aiguë, autrement le repos et une adaptation de l'entraînement est de rigueur. En course à pied les loges concernées sont surtout celles de la jambe, rarement la cuisse,

- Sésamoïdopathie : habituellement due à une surcharge mécanique chez des sportifs avec une hyperflexion répétée de l'hallux. Fracture de stress dans 40% des cas, sésamoïdite 30%, fracture aiguë 10%,
- Tendinopathie des extenseurs (tibial antérieur extenseur des orteils) fréquemment associée à la course en montée ou descente. Douleurs sur le dessus du pied, exacerbé par le port de chaussures serrées.

II. Étiologies et facteurs de risque des blessures en course à pied

a. Syndrome de surutilisation (overuse injuries) ou stress répétitif

Les blessures dues au surmenage en course à pied sont très fréquentes, avec une incidence globale rapportée de 19,4 à 79,3 % (32). Elles résultent principalement d'une accumulation de stress répétitif appliqué au corps sans repos suffisant pour le remodelage tissulaire, entraînant une dégénérescence tissulaire (33). Selon le type de coureur, la définition des RRI et la durée du suivi, une revue systématique compte

2.5 à 33 blessures pour 1000 heures de course (34). L'origine de ces blessures est complexe. Un article de 2005 nous dit que ces blessures de surutilisation en course à pied pourraient être évitables, car ce sont des erreurs d'entraînement (35). En outre, le volume d'entraînement, un BMI élevé et des antécédents de RRI sont des facteurs qui si intriqués majorent le risque de ces blessures (36).

b. Mauvaise adaptation au type de chaussure

Une mauvaise adaptation du type de chaussure au profil du coureur est considérée comme un facteur de risque potentiel de blessure en course à pied. Cependant beaucoup de résultat reste contradictoire. Le choix inapproprié de chaussures peut entraîner une altération de la biomécanique de course, affectant la répartition des charges au niveau des membres inférieurs et augmentant le risque de blessures de surutilisation (37).

Cependant les preuves restent faibles si on reprend les résultats de l'étude de 2022 avec méta analyse incluant 12 essais avec plus de 11 000 participants (38). En résumé cet article nous dit :

- Chaussures neutres/amorties vs. chaussures minimalistes : les chaussures neutres ou amorties pourraient ne pas réduire significativement le nombre de blessures des membres inférieurs par rapport aux chaussures minimalistes. Les preuves sont de faible certitude, avec un risque relatif (RR) de 0,77 (intervalle de confiance à 95 % : 0,59 à 1,01) : résultat non significatif,

- Chaussures de contrôle de mouvement vs. chaussures neutres/amorties : Il est incertain que les chaussures de contrôle de mouvement réduisent les blessures par rapport aux chaussures neutres ou amorties. Les preuves sont de très faible certitude (RR 0,92 ; IC à 95 % : 0,30 à 2,81),
- La prescription de chaussure basée sur la posture du pied : trois études portant sur 7 203 participants ont évalué l'effet de la prescription de chaussures en fonction de la posture statique du pied (pronation, supination, neutre) par rapport à des chaussures non prescrites. Les résultats indiquent probablement peu ou pas de différence dans le nombre de blessures des membres inférieurs, avec un taux de blessure similaire entre les groupes (RR 1,03 ; IC à 95 % : 0,94 à 1,13). Les preuves sont de certitude modérée.

Enfin, on peut dire qu'il n'y a pas de réduction significative des blessures selon le type de chaussure. Aussi, la prescription spécialisée en fonction du type de pied ne semble pas non plus réduire le nombre de blessures liées à la course. Ces preuves restent néanmoins faibles.

Étant donné l'absence de preuves solides en faveur d'un type spécifique de chaussure pour prévenir les blessures, il est recommandé aux coureurs de choisir des chaussures confortables qui correspondent à leurs préférences personnelles. Une attention particulière devrait être portée à l'adaptation progressive à tout nouveau type de chaussure pour minimiser le risque de blessure (38).

c. Faiblesse des muscles stabilisateurs du pied, de la hanche

Les muscles intrinsèques du pied jouent un rôle essentiel dans la stabilisation de la voûte plantaire et la proprioception. Une faiblesse ou une atrophie de ces muscles peut entraîner une instabilité du pied, une pronation excessive et une fatigue accrue de la voûte plantaire. Ces altérations biomécaniques augmentent le risque de pathologies telles que la fasciite plantaire, les métatarsalgies et d'autres blessures liées à la course (39).

La faiblesse de l'abduction de la hanche, évaluée à l'aide d'un dynamomètre portatif, pourrait être associée au syndrome de la bandelette ilio-tibiale chez les coureurs de fond, comme le suggère une revue avec méta-analyse de 2016. Cette faiblesse musculaire pourrait entraîner une instabilité pelvienne et altérer l'alignement dynamique du membre inférieur, favorisant ainsi certaines contraintes mécaniques répétées. Toutefois, son implication dans d'autres pathologies courantes chez les coureurs, tel que le syndrome fémoro-patellaire douloureux, le syndrome de stress tibial médial, les fractures de stress tibiales ou la tendinopathie d'Achille (40).

d. Surface de course

La surface de course est un facteur extrinsèque qui peut affecter la biomécanique du coureur et, par conséquent, le risque de blessure. Les surfaces dures, comme le béton ou l'asphalte, sont souvent associées à une augmentation des forces d'impact sur les membres inférieurs, ce qui pourrait accroître le risque de blessures de surutilisation. Une étude a montré que courir sur du béton génère des accélérations d'impact plus

élevées que sur le gazon ou les pistes synthétiques, ce qui peut augmenter le stress sur les os et les articulations (41).

e. Antécédents de blessure

Les antécédents de blessure constituent un facteur de risque majeur pour les blessures liées à la course à pied. Plusieurs études ont démontré que les coureurs ayant déjà subi une blessure présentent une probabilité significativement plus élevée de se blesser à nouveau, indépendamment de la localisation initiale de la blessure (42,43,44).

Une revue systématique a révélé que les antécédents de blessure sont associés à un risque accru de blessures aux membres inférieurs chez les coureurs. Cette association est attribuée à des altérations persistantes dans la chaîne cinématique, telles que des modifications proprioceptives, une force musculaire réduite ou des schémas de mouvements compensatoires, qui peuvent persister même après la guérison clinique (43).

De plus, une étude a indiqué que les coureurs ayant des antécédents de blessure présentent un taux de blessure plus élevé, avec un rapport de taux de risque de 1,9 (intervalle de confiance à 95 % : 1,2 à 3,2), ce qui signifie qu'ils sont presque deux fois plus susceptibles de subir une nouvelle blessure par rapport à ceux sans antécédents (44). Ces données soulignent l'importance de la prévention secondaire et de la réhabilitation complète avant la reprise de la course. Si tous les coureurs bénéficiaient

d'une évaluation complète de leur rééducation avant la reprise, un nombre important de récurrence pourrait être empêché.

f. Facteurs individuels (42,43,44,45)

- Antécédents de blessure : les coureurs ayant déjà subi une blessure présentent un risque accru de récurrence. Une étude a montré que les antécédents de blessure sont associés à un risque accru de blessures aux membres inférieurs chez les coureurs,
- Expérience en course à pied : les coureurs ayant moins de cinq ans de pratique présentent un risque plus élevé de blessure,
- Sexe : certaines études suggèrent que les femmes peuvent être plus susceptibles aux blessures liées à la course, bien que les résultats varient selon les types de blessures et les études. Une revue de 2021 retrouve une prévalence de 39.7% chez les femmes contre 34.3% chez les hommes (45),
- Indice de masse corporelle (IMC) : un IMC élevé peut augmenter le stress sur les articulations et les tissus, augmentant ainsi le risque de blessure,
- Volume d'entraînement : un volume hebdomadaire de course élevé, notamment au-delà de 64 km, est associé à un risque accru de blessure.

III. Types de foulée et pathologies

a. La fasciite plantaire

La fasciite plantaire est une pathologie fréquente chez les coureurs, représentant environ 10 % des blessures liées à la course à pied. C'est la cause la plus fréquente de douleurs au talon. Elle est souvent bilatérale. C'est un processus inflammatoire qui cause des douleurs au niveau du talon, du tubercule calcanéen médial. La douleurs est spontanée, majorée en charge et à la palpation.

En attaque talon, on sait que l'impact généré sur le talon est moins bien réparti qu'en attaque avant pied (12). Une étude a montré que les coureurs utilisant une attaque talon présentaient des charges plantaires plus élevées au niveau du talon par rapport à ceux utilisant une attaque médio ou avant-pied . Cette augmentation des charges pourrait contribuer au développement de la fasciite plantaire, bien que la relation causale directe n'ait pas été établie de manière définitive. En outre, en attaque talon, le coureur n'utilise que peu son fascia si on compare avec le style de course FFS. Son aponévrose est donc moins renforcée et serait fragilisée (46).

On sait que la foulée avant pied avec chaussures minimalistes ou non augmente la musculature du pied et renforce l'aponévrose plantaire (47, 48).

Il est également important de noter que des facteurs tels que l'augmentation rapide du volume d'entraînement, la faiblesse musculaire, la raideur du tendon d'Achille et le port de chaussures inappropriées peuvent également jouer un rôle significatif dans l'apparition de la fasciite plantaire. La transition trop brutale vers le pattern avant pied est un facteur de risque majeur de blesser son aponévrose plantaire. En revanche une

fois la transition faite, le risque d'en développer une en courant avec chaussure minimaliste et avant pied serait bien moindre selon Daoud et al (49).

b. Tendinopathies achilléennes

Les tendinopathies achilléennes, qui affectent le tendon d'Achille, sont fréquentes chez les coureurs ($p=10\%$), représentant une des principales causes de douleur postérieure à la cheville (50). Le type d'attaque du pied FFS/MFS ou RFS influence la répartition des charges mécaniques sur le tendon. Plusieurs études prouvent que les coureurs en attaque avant-pied sollicitent davantage le complexe muscle-tendon du triceps sural (gastrocnémiens et soléaire), ce qui augmente la charge répétée sur le tendon d'Achille (51). Par conséquent, ils pourraient être plus exposés au risque de tendinopathie achilléenne, notamment en cas de transition mal encadrée vers ce type de foulée. À l'inverse, les coureurs en attaque talon répartissent mieux les charges sur l'ensemble de la chaîne cinétique, avec une sollicitation initiale plus marquée des structures osseuses et articulaires proximales, réduisant potentiellement la contrainte directe sur le tendon d'Achille. Toutefois, le lien entre type de foulée et tendinopathie reste multifactoriel et dépend aussi d'autres variables comme le volume d'entraînement, la technique, les chaussures, ou encore la force musculaire du mollet (52). Chez l'adolescent, une étude récente de 2025 retrouve une incidence de tendinopathie achilléenne deux fois supérieure en attaque avant-pied (53). Cette étude reste néanmoins fortement biaisé car basé sur une autodéclaration des blessures rétrospectives... Daoud en 2012 retrouve une incidence égale dans les deux groupes

mais souligne que des études prospectives de plus grande ampleur sont nécessaire afin de confirmer cette tendance (49).

c. Le syndrome de stress tibial médial (SSTM) ou périostite tibiale

Le syndrome de stress tibial médial (SSTM), communément appelé périostite tibiale, est une pathologie fréquente chez les coureurs ($p=9\%$)(50), caractérisée par une douleur) diffuse le long du bord postéro-médial du tibia. Cette affection résulte de microtraumatismes répétés, souvent liés à une surcharge mécanique, une augmentation trop rapide de la charge d'entraînement ou des déséquilibres biomécaniques. Le type de foulée adopté par le coureur peut influencer la répartition des contraintes mécaniques sur la jambe et, par conséquent, le risque de développer une périostite tibiale.

Sur le plan théorique, une attaque talon (RFS) expose le tibia à des pics de chargement vertical et à des accélérations tibiales plus élevées; ces variables sont corrélées aux contraintes de flexion de la face postéro-médiale de l'os, identifiées parmi les facteurs de risque du syndrome de stress tibial médial (MTSS) . Plusieurs travaux de ré-entraînement montrent qu'un passage vers une attaque médio/avant-pied réduit ces marqueurs mécaniques, d'où l'hypothèse d'un effet protecteur de la foulée avant-pied (54).

D'autres analyses rétrospectives suggèrent même une incidence moindre de fractures de stress tibiales chez les habitués avant-pied, mais leur effectif reste limité et le dessin d'étude est rétrospectif (25).

En conclusion, si la mécanique plaide plutôt contre l'attaque talon, les études cliniques disponibles sont trop dispersées et sous-puissantes pour affirmer qu'un patron d'attaque avant-pied prévient les SSTM. Des cohortes prospectives de grande ampleur, contrôlant la charge d'entraînement et la durée d'exposition, sont nécessaires avant de recommander un changement systématique de foulée.

d. Le syndrome fémoro-patellaire

C'est une pathologie très fréquente en course à pied sa prévalence 16.7% et son incidence 6.3% (50).

Le syndrome fémoro-patellaire (SFP) est une pathologie douloureuse du genou fréquemment rencontrée chez les coureurs (P=16.7% et I=6.3%), notamment lors d'une surcharge mécanique de l'articulation entre la rotule et le fémur. D'un point de vue biomécanique, la foulée avant-pied se distingue nettement de la foulée talon (RFS). Plusieurs paramètres liés au contrôle du genou sont significativement plus faibles avec la foulée avant-pied :

- Le moment d'extension du genou est réduit (différence standardisée moyenne [SMD] : -0.64 ; intervalle de confiance [IC] à 95 % : -0.98 à -0.30 ; $p < 0.001$), indiquant une sollicitation moindre des muscles extenseurs du genou,

- La puissance excentrique du genou, essentielle pour freiner et stabiliser le mouvement, est fortement diminuée (SMD : -2.03 ; IC 95 % : -2.51 à -1.54 ; $p < 0.001$),
- Le travail négatif (énergie absorbée) au niveau du genou suit la même tendance (SMD : -1.56 ; IC 95 % : -2.11 à -1.00 ; $p < 0.001$),
- les contraintes mécaniques sur l'articulation fémoro-patellaire sont également réduites avec la foulée avant-pied, tant pour le pic de stress (SMD : -0.71 ; IC 95 % : -1.28 à -0.14 ; $p = 0.01$) que pour le stress cumulé (SMD : -0.63 ; IC 95 % : -1.11 à -0.15 ; $p = 0.01$).

En résumé, bien que la foulée avant-pied diminue les contraintes directes sur le genou, elle modifie aussi profondément la manière dont les forces sont gérées, ce qui peut avoir des conséquences ailleurs dans la chaîne musculaire et articulaire (55).

Malgré ces preuves d'améliorations biomécaniques, les études sont encore peu démonstratives de supériorité quant à la réduction du syndrome fémoro-patellaire avec la course minimaliste (foulée avant-pied).

Les résultats des études portant sur les blessures liées à la course à pied (Running Related Injuries, RRI) en lien avec le type de chaussure ou de foulée demeurent contradictoires et peu contributifs quant à l'établissement d'un consensus clair. La grande hétérogénéité des méthodologies, des définitions de blessure et des durées de suivi complique toute généralisation. Néanmoins, deux études souvent citées — Daoud et al. ainsi que Altman et al (65). bien que limitées par une faible puissance

statistique, suggèrent que la course pieds nus ou en chaussures minimalistes pourrait être moins génératrice de blessures, à l'exception notable de lésions cutanées. Ces résultats invitent à la prudence, mais ouvrent la voie à de futures recherches mieux structurées sur les effets protecteurs potentiels de la course minimaliste.

3. Les chaussures minimalistes

Depuis quelques années, les chaussures minimalistes connaissent un engouement croissant, porté notamment par le succès du livre *Born to Run* de Christopher McDougall. Dans cet ouvrage, l'auteur raconte sa découverte du peuple Tarahumara, coureurs mexicains capables de parcourir de très longues distances sans fatigue ni blessure, équipés uniquement de sandales rudimentaires appelées Huaraches, constituées de fines semelles et de lacets en cuir. Cette approche naturelle de la course a largement contribué à populariser le concept de chaussure minimaliste.

I. Définition et principe

Une chaussure minimaliste se définit comme un modèle qui interfère le moins possible avec les mouvements naturels du pied. Elle se caractérise par une grande flexibilité, un faible différentiel talon-orteils (drop), une épaisseur de semelle réduite, un poids léger et l'absence de dispositifs de contrôle du mouvement ou de stabilité (56).

L'objectif principal de ces chaussures est de protéger le pied tout en incitant le coureur à adopter une biomécanique de course plus proche de celle observée pieds nus. Cela

se traduit généralement par une attaque au sol par l'avant-pied, une augmentation de la cadence et une réduction du temps de contact au sol. Autant d'adaptations qui visent à améliorer la performance et à limiter le risque de blessures.

II. Effets biomécaniques

Plusieurs études confirment que le port de chaussures minimalistes induit des adaptations similaires à la course pieds nus. On observe un déplacement du point d'impact vers l'avant du pied (56, 57), une augmentation de la cadence (58) et une réduction du temps de contact au sol chez les coureurs expérimentés (57). Les utilisateurs réguliers de ce type de chaussure courent souvent à plus de 170 pas par minute, une cadence comparable à celle des coureurs pieds nus (59). Ces trois paramètres : attaque avant-pied, cadence élevée et temps de contact réduit confèrent à la foulée un aspect plus léger et plus dynamique.

III. Impacts et controverses

Les effets des chaussures minimalistes sur les forces d'impact demeurent toutefois controversés. Certaines études montrent qu'en l'absence de période d'adaptation, le taux de charge (loading rate) est plus élevé, ce qui pourrait augmenter le risque de blessure (62,63). Toutefois d'autres recherches indiquent que, chez les coureurs habitués aux chaussures minimalistes depuis plus de six mois, et utilisant une attaque

avant-pied, ce taux de charge est inférieur à celui observé chez les coureurs attaquant par le talon ou portant des chaussures classiques (64).

IV. Indice minimaliste

Face à la diversité des modèles sur le marché, un indice minimaliste a été créé pour évaluer le niveau de minimalisme d'une chaussure (56). Cinq critères sont pris en compte : l'absence de technologie de stabilité, la flexibilité (longitudinale et transversale), la légèreté, la faible épaisseur de semelle au talon, et un drop réduit. Chaque critère est noté sur 5 points ; le total est multiplié par 4 pour donner un score final exprimé en pourcentage (0 à 100 %). Plus le score est élevé, plus la chaussure est considérée comme minimaliste (La Clinique du Coureur, 2017). Il n'existe toutefois pas de seuil précis pour distinguer formellement une chaussure minimaliste d'une chaussure standard.

4. Transition vers la foulée avant pied et chaussures minimalistes

En raison de la popularisation d'une foulée plus naturelle, la transition de la RFS à la FFS a été étudiée. Les raisons de ce souhait de transition sont multiples :

- Encourager une biomécanique plus naturelle, proche de la course à pied nu,
- Renforcement musculaire : pied et mollet,
- Meilleure proprioception,

- Réduction potentielle de certaines blessures : même si des preuves formelles manquent toujours, la biomécanique de la foulée avant pied fait considérer en théorie un risque de blessure lié au stress répétitif moindre,
- Amélioration des performances,
- Abandon de l'artifice des chaussures toujours plus technologiques.

A noter qu'une transition vers une attaque avant pied a pu éviter des fasciotomies antérieures suite à des syndromes des loges chroniques tibiales antérieurs. Une série de 2 cas en 2011 a permis de réduire la pression intramusculaire en passant à une attaque avant-pied (66). Une étude de cas en 2023 a également évité la fasciotomie en passant à une attaque avant pied avec une rééducation de la foulée en 6 semaines (67).

Une revue systématique avec méta-analyse de 2017 (62) reprend les données de la littérature concernant la transition de la foulée talon à une foulée avant-pied. Les études incluses sont très hétérogènes concernant les populations et surtout on obtient des résultats assez contradictoires.

On sait que l'adoption de chaussures minimalistes favorise une attaque avant-pied, cependant ce n'est pas évident chez 100% des coureurs et une rééducation de la foulée est parfois nécessaire afin d'éviter des effets négatifs. En effet une réception talon avec une chaussure minimaliste entraîne des variables de charges significativement beaucoup plus élevées et serait donc potentiellement néfaste pour prévenir des blessures (68).

Dans 9 études de la revue de Warn et al (62), la rééducation de la foulée a été observée, les auteurs nous expliquent que la façon dont nous courons est plus important que nos chaussures et que la rééducation à la foulée devrait être intégrée

systématiquement dans les transition vers les MFW. Même si peu d'études ont mesuré précisément l'effet de la rééducation certaines ont montré : réduction des pics de force d'impact, meilleure adaptation musculaire, un abandon total de l'attaque talon en MFW.

Gait Retraining :

- Adopter une attaque non talon,
- Augmenter la cadence +10%,
- Raccourcir le pas,
- « running lightly and quietly » = courir légèrement et silencieusement.

Il est important de noter que la revue montre que si la prescription de chaussures minimalistes est préconisée dans le but d'améliorer l'économie de course, la rééducation de la foulée est inutile voire a un effet négatif (68).

Le passage à la foulée avant-pied majore le travail de l'aponévrose plantaire et du mollet. Par conséquent, il est aisé de penser que lors de la phase de transition, le temps que les muscles et le fascia plantaire s'adaptent, le taux de blessure à ces endroits soit majoré (69,70). Cependant cette hypothèse nécessite d'autre étude puisqu'aucune preuve de haut niveau prouve que la phase de transition vers la course minimaliste augmente le taux de blessure.

Concernant les fractures de stress des métatarsiens, des études suggèrent que les coureurs en transition sont à risque, notamment avec des résultats IRM (71) montrant que 10 patients sur 19 du groupe chaussures minimalistes présentaient une augmentation de l'œdème médullaire dans au moins un os après 10 semaines de course ($p=0.009$). Cependant l'œdème médullaire osseux n'est qu'un signe de contrainte mécanique subit par l'os et n'est en aucun cas une fracture réelle. Il est

clair qu'il faut y porter attention puisque cela peut être précurseur de fracture. Deux études de cas évoquent également des fractures des stress métatarsiennes lors du passage aux chaussures minimalistes mais le niveau de preuve est médiocre sans groupe de contrôle (72,73).

Rares sont les études prospectives longitudinales concernant les blessures en course minimaliste et en chaussures standards. Altman et al. en 2015 n'a observé aucune différence entre les 2 groupes après ajustement sur le kilométrage. De plus la majorité des coureurs en MFW courraient depuis peu avec ces chaussures, on pourrait presque les classer « en transition ». Cependant il s'agit d'une étude par enquête et donc avec un biais de rappel ayant pu influencer les résultats (65).

En outre, dans cette revue avec méta-analyse, deux études incluses n'ont identifié aucune différence de blessure entre le groupe chaussure classique et le groupe MFW après entraînement pour une course de 10km sur 12 semaines chez des récréatifs (74) ou après entraînement de 6 mois chez des coureurs expérimentés (75).

Dans cette étude, la question du BMI comme facteur de risque de RRI semble également être en cause. En effet, les patients lourds se blesseraient plus pendant cette transition (75).

Ainsi, sauf si des preuves solides venaient à émerger, rien n'indique que le taux global de blessures soit plus élevé, que ce soit lors de la transition vers des chaussures minimalistes (MFW) ou chez les coureurs les utilisant régulièrement, comparé à ceux courant avec des chaussures de course traditionnelles (CRS). Il peut exister des différences spécifiques dans les types de blessures entre les groupes (par exemple, une augmentation des blessures au pied chez les utilisateurs de MFW) mais cela ne concerne pas le taux global de blessures.

IV] DISCUSSION

1. Interprétation globale : convergences et divergences des données

Notre revue narrative confirme plusieurs tendances robustes :

- Répartition des forces et taux de charge. La foulée avant-médio-pied, souvent induite par les chaussures minimalistes, diminue les pics d'impact verticaux, rallonge la phase d'amortissement musculaire et redistribue la charge vers la cheville et le triceps sural ; inversement, l'attaque talon concentre le choc sur le talon et le genou,
- Blessures : la littérature demeure contradictoire. Certaines études observent une incidence totale comparable entre chaussures standard et minimalistes, mais un déplacement des localisations lésionnelles ($\uparrow$ fractures de stress métatarsiennes pendant la transition, $\downarrow$ syndromes fémoro-patellaires à long terme),
- Économie de course : les méta-analyses récentes pointent un léger gain ($\approx 1-3\%$ de VO_2) lié surtout à la masse réduite de la chaussure et à la cadence plus élevée, sans avantage clair du pied nu par rapport au minimalisme.

La notion de “mécanique naturelle” renvoie à une stratégie motrice évolutivement ancienne : nos ancêtres couraient sans talon amorti et sans masse supplémentaire. Dans ce contexte, les articulations et tissus mous se sont adaptés à dissiper puis restituer l'énergie de l'impact via l'avant-pied et les tendons élastiques, et non via un coussin adipeux sous le talon.

Lorsque l'on réduit le drop et la masse, on enlève un intermédiaire mécanique ; le système neuromoteur "choisit" alors spontanément la stratégie qui minimise la douleur et les contraintes : la foulée avant-pied, cadence élevée et le genou plus fléchi. D'où le qualificatif de mécanique "naturelle".

Les différentes études (cinématiques, forces au sol, métabolisme, épidémiologie des blessures) pointent toutes, à des degrés variables, dans la même direction :

- Réduction du pic d'impact quand on passe à un drop faible,
- Déplacement des contraintes du genou vers la cheville (où les structures élastiques sont plus robustes),
- Légère amélioration de l'économie de course attribuable à la masse moindre et au stockage élastique.

Comme ces résultats concordent malgré des protocoles divers, ils "valident" au sens de renforcent la plausibilité, l'idée qu'une chaussure minimaliste laisse le corps se rapprocher de son mode de fonctionnement originel.

Réduire drop et poids n'est pas une simple mode : c'est un moyen mécanique de laisser le système locomoteur utiliser ses propres amortisseurs biologiques (mollet, tendon, fascia) plutôt qu'un talon de mousse externe. Ce retour à un schéma plus "épuré" explique la diminution des chocs et, potentiellement, de certaines blessures liées au genou sous réserve d'une transition progressive pour laisser les tissus s'adapter.

Élément biomécanique	Effet d'un drop/poids réduit	Pourquoi c'est considéré comme "naturel"
Patron de pose du pied	Tendance à l'attaque médio-/avant-pied au lieu du talon.	C'est le patron observé chez les enfants pieds nus et dans les populations courant sans chaussure.
Pic d'impact vertical	Amplitude et vitesse du choc initial diminuent.	Le mollet et le tendon d'Achille absorbent l'énergie plutôt que l'os du talon.
Cadence / temps de contact	Cadence ↑ (pas plus fréquents), temps de contact ↓.	Imitation du pattern "pied nu" où la jambe agit comme un ressort rapide.
Stockage-restitution élastique	Allongement plus important du tendon d'Achille et du fascia plantaire.	Exploite les ressorts biologiques intégrés, donc moins de travail musculaire "actif".
Moments articulaires	Moment fléchisseur au genou ↓ ; moment plantaire à la cheville ↑ (mieux toléré par le complexe triceps sural/tendon).	Répartit la charge de façon proximale-distale comme chez les coureurs pieds nus.

2. Contextualisation théorique

Le modèle de Nigg (paradigme «Preferred movement path») (76) et celui de Lieberman postulent que le corps dispose d'une stratégie motrice optimale tant qu'aucune interface (chaussure épaisse) ne l'en empêche. Nos résultats s'inscrivent dans ce cadre en montrant que :

- La foulée avant-pied accroît le stockage-restitution d'énergie élastique (tendon d'Achille, fascia plantaire), mécanisme cohérent avec la théorie du ressort du membre inférieur,
- La cadence élevée réduit la fenêtre de production de force verticale et limite l'excentricité du quadriceps, en phase avec les modèles de réduction du travail négatif au genou. En fait, la cadence élevée réduit la longueur de la foulée, le

pied arrive donc sous le centre de masse. La phase d'appui est plus brève, le temps de contact avec le sol est réduit. La force de réaction du sol ne disparaît pas mais est appliquée sur une durée plus courte. Moins de temps au sol induit des impulsions verticales plus faibles. Ainsi on a moins d'oscillations verticales du centre de gravité. Avec un pas plus court, le corps rebondit moins haut et il faut donc appliquer moins d'énergie potentielle gravitationnelle à chaque cycle.

En attaque talon à cadence basse, le genou est quasi tendu à l'impact puis fléchit rapidement. Le quadriceps travaille en excentrique pour freiner la chute du centre de masse et absorber la FRS (pic vertical).

Alors qu'en avant pied, la cadence est plus rapide, le genou arrive légèrement fléchi, la hanche est d'avantage engagée. Il y a moins de déplacement à freiner, moins de travail négatif au niveau du genou. On rappelle les données de la méta-analyse incluse dans la revue (55) : une diminution très marquée de la puissance excentrique du genou ($SMD \approx -2,0$) et du travail négatif ($SMD \approx -1,6$) chez les coureurs avant-pied/minimalistes par rapport à la foulée RFS. Autrement dit, le quadriceps travaille moins pour absorber l'impact; la charge est redistribuée vers la cheville et le triceps sural, tissus mieux armés pour un travail élastique de type ressort.

- Connexion avec les modèles énergétiques (Spring mass et Work-Loops) : ils indiquent tout deux qu'à une vitesse v , minimiser le travail négatif diminue la dépense métabolique car l'énergie absorbée doit ensuite être restituée activement (77). Des études mesurent au niveau du complexe tendon achilléen-triceps sural une restitution de 50% maximum de l'énergie stockée, le reste

étant dissipé inutilement sous forme de chaleur. Les 50% restitué sont de l'énergie « gratuite » récupéré par la fonction ressort du tendon.

- Cadence augmentée → temps de freinage diminué → travail négatif du genou diminué
- Foulée avant-pied : amortissement musculaire réparti sur le triceps sural et le fascia plantaire → encore moins de freinage au genou

En somme, cette diminution du travail négatif au genou éclaire pourquoi les études convergent vers un gain métabolique mesurable chez les coureurs chaussés minimalistes. En effet, le potentiel élastique de stockage du tendon rotulien est faible comparé au tendon d'Achille, l'énergie est donc dissipée dans le muscle et non restitué par le tendon (78).

3. Qualités et limites méthodologiques

- Nature narrative : l'absence de protocole PRISMA standardisé entraîne un risque de biais de sélection. Nous avons toutefois recoupé les conclusions des méta-analyses et contrôlé la cohérence interne,
- Hétérogénéité : les études varient dans les populations (récréatifs vs élites), la durée d'exposition (< 12 semaines vs > 6 mois) et les critères de blessure,
- Puissance statistique : Plusieurs travaux prospectifs restent sous-dimensionnés ($n < 100$) pour détecter des effets faibles,

- Manques populationnels : peu d'études portent sur les adolescents pourtant en phase d'acquisition motrice, les femmes, qui présentent un profil lésionnel différent (↑ douleurs fémoro-patellaires),
- Biais potentiels : rappel rétrospectif des blessures, auto-déclaration du type d'attaque, absence d'aveugle sur le chaussage.

4. Implications des résultats

I. Théoriques

Nos données remettent en cause la croyance selon laquelle l'amorti talonnier prévient mécaniquement les blessures. À minima, la course minimaliste apparaît non inférieure, et plusieurs indicateurs de contrainte articulaire plaident pour un bénéfice distal-proximal (↓ stress fémoro-patellaire).

Bénéfice distal-proximal : les données montrent qu'avec une foulée avant-pied et des chaussures minimalistes, une plus grande part de la charge est prise par le système cheville-pied (distal), doté de tendons épais capables de stocker l'énergie, tandis que la charge diminue au niveau du genou (proximal).

II. Pratiques

- Education motrice précoce : surveiller le schéma d'attaque du pied chez les adolescents, notamment en cours d'éducation physique (EPS), tout en formant les enseignants et entraîneurs à reconnaître la diversité des foulées. Encourager les jeunes à adopter naturellement le schéma qui leur convient le mieux, en s'appuyant sur l'idée que leur corps tend spontanément vers ce qui est le plus adapté pour eux
- Prescription individualisée : orienter vers des chaussures légères à drop réduit si le coureur accepte une transition graduelle (≥ 12 semaines, +10 % cadence, travail proprioceptif),
- Arrêt de la promotion exclusive de l'amorti : Les recommandations d'équipement devraient insister d'abord sur le confort subjectif, la progression de charge et la technique, plutôt que sur la «protection» supposée du talon épais.
- Il convient de ne pas proposer de changement de type de foulée chez des coureur aguerri ne présentant pas de pathologie spécifique de course à pied. Si des signes de SFP viendraient à se manifester, proposer une transition vers les MFW avec une rééducation à la foulée vers l'avant-pied semble être souhaitable compte tenu des éléments de la littérature dont nous disposons.

5. Pistes de recherches futures

I. Evaluer l'incidence des blessures en fonction des types de foulée : étude de cohorte prospective

- L'objectif serait de comparer l'incidence, la localisation et la sévérité des blessures entre coureur RFS, MFS et FFS sur 24 mois de suivi,
- Hypothèse : les coureurs MFS et FFS présentent un risque global de blessure non supérieur et une localisation de celle-ci plus distale (pied-jambe) que les RFS (genou-hanche),
- Design : cohorte prospective multicentrique : club, magasin de sport...,
- Population d'adulte >1500 coureurs au moins 10km/semaine, indemnes de blessure non totalement guéries sinon exclus d'emblée. Les 2 groupes doivent maîtriser leur foulée depuis au moins 6 mois,
- Stratification des groupes : pattern d'attaque déterminé par analyse vidéo haute vitesse (240 i/s) sur tapis instrumenté à allure habituelle : $<5^\circ$ dorsiflex = FFS ; $5-15^\circ$ = MFS ; $>15^\circ$ = RFS. La classification est répliquée sur piste afin de confirmer les groupes, toujours avec les chaussures habituelles,

- Variables mesurées : âge, sexe, IMC, historique des blessures, volume hebdomadaire, surfaces, type/âge des chaussures, cadence, drop et masse de la chaussure, renforcement musculaire, sommeil, stress perçu,
- Recueil des blessures : consensus sur les RRI, déclaration sur application mobile, validation par rendez-vous médecin, codage localisation et type en fonction du consensus RRI, sévérité,
- Critère principal : incidence (nombre de premières blessures / 1 000 h de course) par pattern,
- Qualité et biais : mesure de l'angle de dorsiflexion pour le biais de classement, biais de rappel nul car étude prospective,
- Intérêts :
 - Tableau clair du risque et du type de blessures lié à chaque pattern,
 - Modèle prédictif ajusté permettant aux entraîneurs et médecins de mieux cibler la prévention (technique, renforcement, charge),
 - Base pour essais d'interventions ultérieures (gait-retraining ciblé).

Le niveau de preuve apporté par une telle étude, si elle est bien conduite, pourrait s'avérer déterminant, soit un niveau de preuve 2 et un grade de recommandation B. Elle permettrait potentiellement de trancher le débat et d'orienter le développement des chaussures de sport vers des modèles qui protègent le pied tout en laissant la

physiologie naturelle du corps jouer un rôle central. Plutôt que de continuer, comme c'est le cas depuis plus de 50 ans, à fabriquer des chaussures conçues pour une attaque talon, sans qu'aucune preuve scientifique solide ne vienne réellement justifier ce choix.

II. Transition & blessures – Cohorte prospective comparative

- Objectifs : quantifier l'incidence, le délai d'apparition et la localisation des blessures chez de nouveaux coureurs qui passent soit au minimalisme, soit à une chaussure standard,
- Population : ≥ 500 adultes débutants (aucune course régulière < 12 mois), randomisés en groupe « minimaliste » ($\text{drop} \leq 4 \text{ mm}$, poids $< 220 \text{ g}$) vs groupe « standard » ($\text{drop} \geq 10 \text{ mm}$),
- Suivi : 24 mois. Tests biomécaniques de départ, puis visites trimestrielles. Journal d'entraînement numérique + appli smartphone qui enregistre charge, type de chaussure et douleur quotidienne (échelle 0-10),
- Mesures clefs : pic d'impact par capteurs inertiels, questionnaire pour dépister blessure. IRM pied-tibia si douleurs persistantes pour repérer fracture de stress,
- Analyse : surrisque pendant la transition (3 premiers mois) vs après adaptation,

- Forces et limites : large effectif et mesure objective des charges biomécaniques, mais aveugle impossible, changement de pattern prévisible et incontrôlable.

III. Prévention secondaire du SFP – essai parallèle randomisé

- Deux groupes :
 - 1 : rééducation standard (contrôle),
 - 2 : rééducation standard + « gait-retraining à la foulée minimaliste ».
- Durée : 12-16 semaines, suivi 12-18 mois pour les récives,
- Mesures : douleurs, biomécaniques, reprise de la course, récive du SFP.

Ces trois projets d'étude apporteraient des données décisives pour déterminer quel type de foulée il convient de promouvoir. Aujourd'hui, la profusion de travaux, souvent contradictoires, brouille les pistes et complique tout conseil éclairé en faveur de l'une ou l'autre technique.

V] CONCLUSION

Notre revue narrative montre qu'abaisser le drop et la masse de la chaussure rapproche la foulée de la mécanique « naturelle » : redistribution des charges vers la cheville-pied, diminution du pic d'impact vertical et léger gain d'économie de course ($\approx 1-3\%$ VO_2). Sur le plan clinique, l'incidence globale des blessures reste comparable

à celle observée avec des chaussures traditionnelles, mais leur topographie change, avec une baisse probable des syndromes fémoro-patellaires, contre une hausse transitoire des lésions métatarsiennes ou tendinopathies achilléennes quand la transition est trop rapide.

Les limites de la littérature demeurent importantes: hétérogénéité méthodologique, petits effectifs, sous-représentation des adolescents et des femmes, définitions de blessure variables, et rareté d'études au long.

Implications pratiques :

- Cessez de promouvoir l'amorti talonnier comme solution universelle; privilégiez le confort subjectif, la gestion de charge et l'éducation technique,
- Réfléchir à intégrer l'apprentissage du pattern avant-medio-pied dans les programmes d'EPS et de rééducation. Voire ne conseiller aucun pattern spécifique ni l'achat de chaussure de « running » puisqu'aucune preuve de leur supériorité ne leur est attribuée.

En résumé, la course minimaliste n'est ni une panacée ni une pratique intrinsèquement dangereuse. Elle apparaît au moins non inférieure, et parfois avantageuse, dès lors qu'elle est individualisée et scientifiquement encadrée. La prochaine décennie de travaux devra clarifier les protocoles de transition, cibler les populations à risque et déterminer si ces gains modérés se traduisent, à long terme, par une meilleure santé musculo-squelettique et des performances accrues.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 : <https://www.filieresport.com> Territoire – Observatoire running 2024
- 2 : Yamato TP, Saragiotto BT, Lopes AD. A consensus definition of running-related injury in recreational runners: a modified Delphi approach. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2015 May;45(5):375–80. doi:10.2519/jospt.2015.5741. PMID: 25808527.
- 3 : Stenerson LR, Melton BF, Bland HW, Ryan GA. Running-related overuse injuries and their relationship with run and resistance training characteristics in adult recreational runners: a cross-sectional study. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2023 Sep 5;8(3):128. doi:10.3390/jfmk8030128. PMID: 37754962; PMCID: PMC10532616.
- 4 : Kakouris N, Yener N, Fong DTP. A systematic review of running-related musculoskeletal injuries in runners. *J Sport Health Sci.* 2021 Oct;10(5):513–22. doi:10.1016/j.jshs.2021.04.001. PMID: 33862272; PMCID: PMC8500811.
- 5 : Hulme A, Nielsen RO, Timpka T, et al. Risk factors for running-related injuries: An umbrella systematic review. *J Sport Health Sci.* 2024;13(1):1–10. doi:10.1016/j.jshs.2023.10.005.
- 6 : van der Worp MP, ten Haaf DSM, van Cingel R, et al. Factors Associated With Running-Related Injuries in Recreational Runners With a History of Injury: A Prospective Cohort Study. *Clin J Sport Med.* 2023;33(1):12–18. doi:10.1097/JSM.0000000000001045
- 7 : Moore IS. Biomechanical and Musculoskeletal Measurements as Risk Factors for Running-Related Injury in Non-elite Runners: A Prospective Study. *Sports Med Open.* 2022;8(1):1–12. doi:10.1186/s40798-022-00416-z
- 8 : Vincent HK, Coffey K, Villasuso A, Vincent KR, Shararehifar S, Pezzullo L, Nixon RM. Accuracy of self-reported foot strike pattern detection among endurance runners. *Front Sports Act Living.* 2024;6:1491486. doi:10.3389/fspor.2024.1491486
- 9 : Dempster J, Dutheil F, Ugbohue UC. The prevalence of lower extremity injuries in running and associated risk factors: a systematic review. *Phys Act Health.* 2021 Jul 9;5(1):133–145. doi:10.5334/paah.109

- 10 : Francis P, Whatman C, Sheerin K, Hume P, Johnson MI. The proportion of lower limb running injuries by gender, anatomical location and specific pathology: a systematic review. *J Sports Sci Med*. 2019 Feb 11;18(1):21–31. PMID: 30787648; PMCID: PMC6370968.
- 11 : Moore IS, Pitt W, Nunns M, Dixon S. Effects of a seven-week minimalist footwear transition programme on footstrike modality, pressure variables and loading rates. *Footwear Sci*. 2014;7:17–29.
- 12 : Lieberman DE, Venkadesan M, Werbel WA, Daoud AI, D'Andrea S, Davis IS, Mang'eni RO, Pitsiladis Y. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*. 2010 Jan 28;463(7280):531–5. doi:10.1038/nature08723.
- 13 : Zadpoor AA, Nikooyan AA. The relationship between lower-extremity stress fractures and the ground reaction force: a systematic review. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2011 Jan;26(1):23–8. doi:10.1016/j.clinbiomech.2010.08.005.
- 14 : Lieberman DE, Venkadesan M, Werbel WA, et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*. 2010;463(7280):531–535.
- 15 : Hamill J, Gruber AH, Derrick TR. Lower extremity joint stiffness characteristics during running with different footfall patterns. *Eur J Sport Sci*. 2014;14(2):130–136.
- 16 : Kulmala JP, Avela J, Pasanen K, Parkkari J. Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers. *Med Sci Sports Exerc*. 2013;45(12):2306–2313.
- 17 : Frédéric Brigaud : La course à pied : Posture, biomécanique, performance
- 18 : Stearne SM, McDonald KA, Alderson JA, North I, Pires NJ, Rubenson J. The foot's arch and the energetics of human locomotion. *Sci Rep*. 2016;6:19403. doi:10.1038/srep19403.
- 19 : Perl DP, Daoud AI, Lieberman DE. Effects of footwear and strike type on running economy. *Med Sci Sports Exerc*. 2012 Jul;44(7):1335–43. doi:10.1249/MSS.0b013e318247989e.

- 20 : Hayes P, Caplan N. Foot strike patterns and ground contact times during high-calibre middle-distance races. *J Sports Sci.* 2012;30(12):1275–83. doi:10.1080/02640414.2012.707326.
- 21 : Nunns M, House C, Fallowfield J, Allsopp A, Dixon S. Biomechanical characteristics of barefoot footstrike modalities. *J Biomech.* 2013 Oct 18;46(15):2603–10. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.08.009.
- 22 : Thompson M, Hoffman K, Blythe L, Hasler R, Longtain M. The Coupling of Stride Length and Foot Strike in Running. *Front Sports Act Living.* 2022 Apr 12;4:768801. doi:10.3389/fspor.2022.768801.
- 23 : Gámez-Payá J, Aladro-Gonzalvo AR, Gallego-de Marcos D, Villarón-Casales C, López-del Amo JL. Footstrike pattern and cadence of the marathon athletes at the Tokyo 2020 Olympic Games. *Appl Sci.* 2023;13(11):6620. doi:10.3390/app13116620.
- 24 : Altman AR, Davis IS. A kinematic method for footstrike pattern detection in barefoot and shod runners. *Gait Posture.* 2012 Feb;35(2):298–300. doi:10.1016/j.gaitpost.2011.09.104
- 25 : Yong JR, Silder A, Montgomery KL, Fredericson M, Delp SL. Acute changes in foot strike pattern and cadence affect running parameters associated with tibial stress fractures. *J Biomech.* 2018 May 18;76:1–7. doi:10.1016/j.jbiomech.2018.05.017. PMID: 29866518; PMCID: PMC6203338.
- 26 : Cheung RT, Ngai SP. Effects of footwear on running economy in distance runners: a meta-analytical review. *J Sci Med Sport.* 2016 Mar;19(3):260–6. doi:10.1016/j.jsams.2015.03.002
- 27 : Gruber AH, Umberger BR, Braun B, Hamill J. Economy and rate of carbohydrate oxidation during running with rearfoot and forefoot strike patterns. *J Appl Physiol.* 2013;115(2):194–201.
- 28 : Warne JP, Moran KA, Warrington GD. Eight weeks gait retraining in minimalist footwear has no effect on running economy. *Hum Mov Sci.* 2015;42:183–92. doi:10.1016/j.humov.2015.05.005.

- 29 : Lindlein K, Hollander K, Zoch A, Braumann KM, Zech A. Improving running economy by transitioning to minimalist footwear: a randomised controlled trial. *J Sci Med Sport*. 2018 Dec;21(12):1298–1303. doi:10.1016/j.jsams.2018.05.017
- 30 : Fuller JT, Bellenger CR, Thewlis D, Tsiros MD, Buckley JD. The effect of footwear on running performance and running economy in distance runners: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med*. 2015;45(3):411–22. doi:10.1007/s40279-014-0288-5.
- 31 : Xu L, Wang Y, Wen X. The role of footwear in improving running economy: a systematic review with meta-analysis of controlled trials. *Sci Rep*. 2025 Feb 1;15(1):3963. doi:10.1038/s41598-025-88271-2.
- 32 : van Gent RN, Siem D, van Middelkoop M, van Os AG, Bierma-Zeinstra SMA, Koes BW, et al. Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: a systematic review * COMMENTARY. *Br J Sports Med*. 2007;41:469–480. doi: 10.1136/bjsm.2006.033548
- 33 : 5.Willwacher S, et al. Running shoes: injury protection and performance enhancement. In: Müller B, Wolf SI, Brueggemann G-P, Deng Z, McIntosh A, Miller F, et al., editors. *Handbook of Human motion* [Internet] Springer International Publishing; 2017. pp. 1–16. [[Google Scholar](#)]
- 34 : Videbæk S, Bueno AM, Nielsen RO, Rasmussen S. Incidence of running-related injuries per 1000 h of running in different types of runners: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med*. 2015;45:1017–1026. doi: 10.1007/s40279-015-0333-8
- 35 : van Mechelen W. Etiology, prevention, and early intervention of overuse injuries in runners: a biomechanical perspective. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2005 Aug;16(3):651–67, vi. doi:10.1016/j.pmr.2005.02.002.
- 36 : Buist I, Bredeweg SW, van Mechelen W, Lemmink KA, Diercks RL. A step towards understanding the mechanisms of running-related injuries. *J Sci Med Sport*. 2015 Sep;18(5):523–8. doi:10.1016/j.jsams.2014.07.014.
- 37 : Knapik JJ, Trone DW, Swedler DI, Villasenor A, Bullock SH, Schmied E, et al. Injury reduction effectiveness of assigning running shoes based on plantar shape in marine corps basic training. *American Journal of Sports Medicine* 2010;38(9):1759-67. [DOI: 10.1177/0363546510369548]

- 38 : Relph N, Greaves H, Armstrong R, Prior TD, Spencer S, Griffiths IB, Dey P, Langley B. Running shoes for preventing lower limb running injuries in adults. *Cochrane Database Syst Rev.* 2022 Aug 22;8(8):CD013368. doi:10.1002/14651858.CD013368.pub2.
- 39 : Jastifer JR. Contemporary review: the foot and ankle in long-distance running. *Foot Ankle Orthop.* 2022 Sep 26;7(3):24730114221125455. doi:10.1177/24730114221125455.
- 40 : Mucha MD, Caldwell W, Schlueter EL, Walters CM, Hassen A, Wang H, et al. Hip abductor strength and lower extremity running related injury in distance runners: a systematic review. *J Sci Med Sport.* 2017 Apr;20(4):349–55. doi:10.1016/j.jsams.2016.09.002
- 41 : Pérez-Soriano P, et al. An Analysis of Running Impact on Different Surfaces for Injury Prevention. *Int J Environ Res Public Health.* 2023;20(14):6405. doi:10.3390/ijerph20146405
- 42 : Hrysomallis C. Injury risk is altered by previous injury: a systematic review of the literature. *J Sport Rehabil.* 2013;22(4):327–32. doi:10.1123/jsr.22.4.327
- 43 : van der Worp MP, ten Haaf DSM, van Cingel R, de Wijer A, Nijhuis-van der Sanden MWG, Staal JB. Injuries in runners; a systematic review on risk factors and sex differences. *PLoS One.* 2015;10(2):e0114937. doi:10.1371/journal.pone.0114937. [Wikipedia+1PMC+1](#)
- 44 : Hespanhol Junior LC, van Mechelen W, Postuma E, Verhagen E. Recreational runners with a history of injury are twice as likely to sustain a new running-related injury: a prospective cohort study. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2021;51(1):10-17. doi:10.2519/jospt.2021.9673
- 45 : Dempster J, Dutheil F, Ugbohue UC. The prevalence of lower extremity injuries in running and associated risk factors: a systematic review. *Phys Act Health.* 2021;5(1):133–145. doi:10.5334/paah.109.
- 46 : Ridge ST, Olsen MT, Bruening DA, et al. Walking in minimalist shoes is effective for strengthening foot muscles. *J Sports Sci Med.* 2019;18(1):1–8.

- 47 : Curtis R, Willems C, Paoletti P, D'Août K. Daily activity in minimal footwear increases foot strength. *Sci Rep*. 2021;11:18648.
- 48 : Xu J, Saliba SA, Jaffri AH. The effects of minimalist shoes on plantar intrinsic foot muscle size and strength: A systematic review. *Int J Sports Med*. 2023;44(5):389–396.
- 49 : Daoud AI, Geissler GJ, Wang F, Saretsky J, Daoud YA, Lieberman DE. Foot strike and injury rates in endurance runners: a retrospective study. *Med Sci Sports Exerc*. 2012 Jul;44(7):1325–34. doi:10.1249/MSS.0b013e3182465115.
- 50 : Kakouris N, Yener N, Fong DTP. A systematic review of running-related musculoskeletal injuries in runners. *J Sport Health Sci*. 2021;10(5):513–22. doi:10.1016/j.jshs.2021.04.001.
- 51 : Almonroeder T, Willson JD, Kernozek TW. The effect of foot strike pattern on Achilles tendon load during running. *Ann Biomed Eng*. 2013;41(8):1758–66. doi:10.1007/s10439-013-0819-1.
- 52 : Rice HM, Patel M. Manipulation of foot strike and footwear increases Achilles tendon loading during running. *Am J Sports Med*. 2017;45(10):2411–7. doi:10.1177/0363546517704429.
- 53 : Goto H, Torii S. Epidemiology of adolescent runners: non-rearfoot strike is associated with the Achilles tendon and lower leg injury. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2025;17(1):27. doi:10.1186/s13102-024-01048-4
- 54 : Miners T, Witchalls J, Bousie JA, Radcliffe CR, Newman P. The Influence of Running Technique Modifications on Vertical Tibial Load Estimates: A Combined Experimental and Machine Learning Approach in the Context of Medial Tibial Stress Syndrome. *Biomechanics*. 2025;5(2):22. doi:10.3390/biomechanics5020022
- 55 : Xu Y, Yuan P, Wang R, Wang D, Liu J, Zhou H. Effects of foot strike techniques on running biomechanics: a systematic review and meta-analysis. *Sports Health*. 2021 Jan-Feb;13(1):71–77. doi:10.1177/1941738120934715
- 56 : Warne JP, Kilduff SM, Gregan BC, Nevill AM, Moran KA, Warrington GD. A 4-week instructed minimalist running transition and gait-retraining changes plantar pressure and force. *Scand J Med Sci Sports*. 2014;24(4):563-568. doi:10.1111/sms.12032

57 : Squadrone R, Gallozzi C. Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners. *J Sports Med Phys Fitness*. 2009;49(1):6-13.

58 : Warne JP, Warrington GD. Four-week habituation to simulated barefoot running improves running economy when compared with shod running. *Scand J Med Sci Sports*. 2014;24(4):563-568. doi:10.1111/sms.12032

59 : Dubois B. Keep the step rate (cadence) up! *The Running Clinic*. 2015. Disponible sur : <https://therunningclinic.com/runners/i-am-a-beginner/keep-the-step-rate-cadence-up/keep-the-step-rate-cadence-up/>

62 : Warne JP, Gruber AH. Transitioning to minimal footwear: a systematic review of methods and future clinical recommendations. *Sports Med Open*. 2017;3(1):33. doi:10.1186/s40798-017-0096-x

63 : Willy RW, Davis IS. Kinematic and kinetic comparison of running in standard and minimalist shoes. *Med Sci Sports Exerc*. 2014;46(2):318-323. doi:10.1249/MSS.0b013e3182a595d2

64 : Goss DL, Gross MT. A review of mechanics and injury trends among various running styles. *US Army Med Dep J*. 2012;2012(Oct-Dec):62-71.

65 : Altman AR, Davis IS. Prospective comparison of running injuries between shod and barefoot runners. *Br J Sports Med*. 2015:1–6. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26130697>.

66 : 6. Diebal AR, Gregory R, Alitz C, Gerber JP. Effects of forefoot running on chronic exertional compartment syndrome: a case series. *Int J Sports Phys Ther*. 2011; 6 (4): 312– 321

67 : Allison AK, Ishikawa KL, Gerber JP, Dewing C. Chronic exertional compartment syndrome resolved with running gait retraining: a case report. *J Athl Train*. 2023 Jul 7;58(4):345–348. doi:10.4085/85.22.

68 McCarthy C, Fleming N, Donne B, Blanksby B. 12 weeks of simulated barefoot running changes foot-strike patterns in female runners. *Int J Sports Med*. 2014;35(5):443–450. doi:10.1055/s-0033-1353200

- 69 : Warne JP, Smyth BP, Fagan JO, Hone ME, Richter C, Nevill AM, et al. Kinetic changes during a six-week minimal footwear and gait-retraining intervention in runners. *J Sports Sci.* 2016;1–9.
- 70 : Moore IS, Pitt W, Nunns M, Dixon S. Effects of a seven-week minimalist footwear transition programme on footstrike modality, pressure variables and loading rates. *Footwear Sci.* 2014;7:17–29.
- 71 : Ridge ST, Johnson AW, Mitchell UH, Hunter I, Robinson E, Rich BSE, et al. Foot bone marrow edema after a 10-wk transition to minimalist running shoes. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45:1363–8. [cited 2016 Jun 23] Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23439417>
- 72 : Cauthon DJ, Langer P, Coniglione TC. Minimalist shoe injuries: three case reports. *Foot (Edinb).* 2013;23:100–3. [cited 2016 Jun 23] Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23664740>.
- 73 : Giuliani J, Masini B, Alitz C, Owens LBD. Barefoot-simulating footwear associated with metatarsal stress injury in 2 runners. *Orthopedics.* 2011;34:e320–3.
- 74 : Ryan M, Elashi M, Newsham-West R, Taunton J. Examining injury risk and pain perception in runners using minimalist footwear. *Br J Sports Med.* 2014;48:1257–62. [cited 2016 Oct 26] Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24357642>.
- 75 : Fuller JT, Thewlis D, Buckley JD, Brown NAT, Hamill J, Tsiros MD. Body mass and weekly training distance influence the pain and injuries experienced by runners using minimalist shoes. *Am J Sports Med.* 2017;45(5):1162–1170
- 76 : Nigg BM, Vienneau J, Smith AC, Trudeau MB, Mohr M, Nigg SR. The Preferred Movement Path Paradigm: Influence of Running Shoes on Joint Movement. *Med Sci Sports Exerc.* 2017 Aug;49(8):1641-1648. doi:10.1249/MSS.0000000000001260.
- 77 : Williams & co. The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *J Appl Physiol.* 1998;85(4):1193-7.
- 78 : Lai AKM et al. Different lower limb muscles perform work in different biomechanical tasks: implications for reducing energy cost. *J R Soc Interface.* 2015;12(111):20150784.

ILLUSTRATIONS – PATHOLOGIES COURANTES LIÉES À LA COURSE À PIED

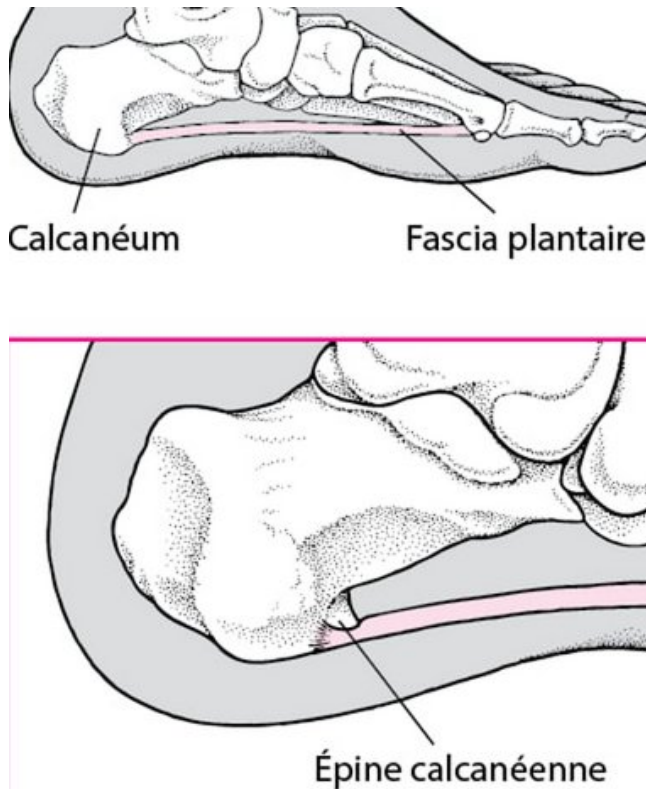


Illustration 1 : Schéma vue sagittale du fascia plantaire ainsi que d'une épine calcanéenne

<https://www.msmanuals.com/fr/accueil/troubles-osseux-articulaires-et-musculaires/probl%C3%A8mes-de-pied-et-de-cheville/fasciite-plantaire>

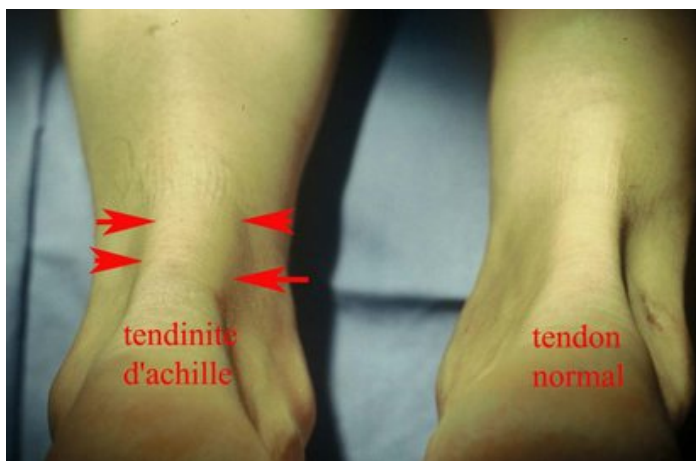


Illustration 2 : Aspect d'une tendinite achilléenne aigue gauche et normale à droite

<https://www.clinique-pied.com/le-pied/le-tendon-dachille/>



Illustration 3 : anatomie et localisation de la douleurs lors du syndrome de la bandelette ilio-tibiale ou syndrome de l'essuie-glace.

<https://leminimaliste.info/comment-jai-gueri-le-syndrome-de-lessuie-glace-syndrome-de-la-bandelette-ilio-tibiale/>

Tableau 3.

Classification topographique des principales formes de pubalgie mécanique

Pubalgie sus-pubienne ou pariéto-abdominale	• Atteinte d'apparition progressive des muscles grands larges de l'abdomen (obliques externe et interne, transverse profond) • Autre forme (souvent aiguë) : muscles grand droit $\pm$ pyramidal abdominal
Pubalgie pubienne	• Ostéo-arthropathie pubienne ou ostéo-enthésopathie symphysaire d'apparition progressive
Pubalgie sous-pubienne	• Déchirure aiguë de l'insertion myotendineuse ou ténio-périostée des adducteurs • Maladie chronique ou tendinopathie adducteurs

Illustration 4 : Classification topographique des pubalgies

<https://www.revmed.ch/revue-medicale-suisse/2007/revue-medicale-suisse-120/pubalgie-du-sportif>

Classification	% fibres déchirées	Douleur / Inflammation	Déficits Fonctionnels	Temps de récupération
Stade I (Léger)	Déchirure légère < 5%	Oedème minime; douleur/ sensibilité ressentie que le jour suivant	Perte minime / pas de perte de force ou de fonction	7-21 Jours
Stade II (Modéré)	Déchirure partielle ~50%	Douleur significative associée à un oedème	Diminution évidente de force + fonction	2-3 Mois
Stade III (Sévère)	Rupture complète 100%	Oedème et douleur importants	Perte complète de force + fonction	6 Mois et + (avec probable chirurgie)

Illustration 5 : Classification des déchirures musculaires

<https://www.physio-network.com/fr/blog/faut-il-etirer-un-claquage/>

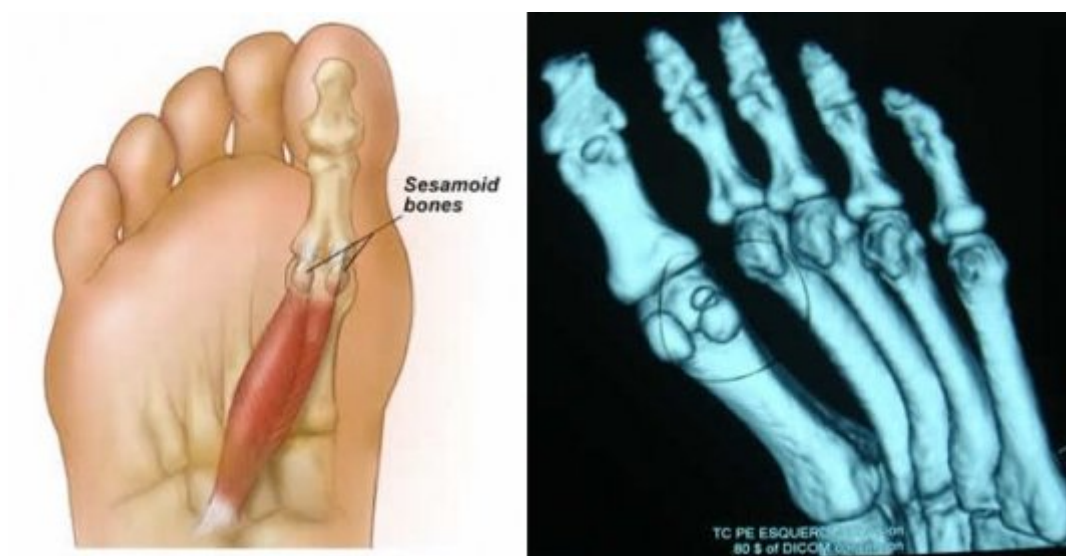


Illustration 6 : sésamoïde de l'hallux droit

<https://www.jean-jaures-podologie.fr/pages/les-actes-du-pedicure-podologue/theme-du-mois/les-sesamoidopathies.html>



Illustration 7 : Fracture de stress de l'os naviculaire du pied

<https://la-clinique-du-pied.fr/pied/pathologie-pied/fracture-os-naviculaire-pied>

ANNEXES - BIOMECHANIQUE

Titre de l'étude	Auteurs & année	Type d'étude	Population	Résultats	format bibliographique Vancouver
The Relationship Between Running Biomechanics and Running Economy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies	Van Hooren et al. 2024	Systematic review	1115 H&F	Cadence ($r=-0,20$), déplacement vertical ($r=0,35$), raideur verticale ($r=-0,31$), raideur de la jambe ($r=-0,28$) associés significativement à la RE. Biomécanique prise isolément peut expliquer 4-12% de la variation de la RE	Van Hooren B, Jukic I, Cox M, Frenken KG, Bautista I, Moore IS. The relationship between running biomechanics and running economy: a systematic review and meta-analysis of observational studies. <i>Sports Med.</i> 2024 Mar 6;54(5):1269–1316. doi:10.1007/s40279-024-01997-3. PMID: 38446400; PMCID: PMC11127892.
Biomechanical differences between habitual forefoot and rearfoot strike running: A systematic review	Hairon et al. 2024	Systematic review	451 H&F	FFS : impact en Flex plantaire, genou et hanche fléchi > RFS, amortissement > RFS, RE > car raideur ressort achilléen. RFS : impact de la chev en dorsiflex, taux de charge et impact > FFS, charge transférée au genou GT en FFS bénéfique pour SFP, meilleure RE	Chen H, Sun D, Zhang Q, Liu Q, Bíró I, Gu Y. Biomechanical differences between habitual forefoot and rearfoot strike running: a systematic review. <i>Adv Exerc Health Sci.</i> 2024;11:100004. doi:10.1016/j.aehs.2024.11.004.
Metabolic responses of running shod and barefoot in mid-forefoot runners	V .HK et al. 2014	essai contrôlé randomisé	16 H/ 5F	barefoot condition : cadence +2,5% gravity vertical displacement -0,5 cm($p<0,05$) ; no significant metabolic differences between shod & barefoot running	Vincent HK, Montero C, Conrad BP, Seay A, Edenfield K, Vincent KR. Metabolic responses of running shod and barefoot in mid-forefoot runners. <i>J Sports Med Phys Fitness.</i> 2014 Aug;54(4):447–55. Epub 2014 Apr 29. PMID: 24777114.

ANNEXES - BIOMECANIQUE

Effects of foot strike techniques on running biomechanics: a systematic review and meta-analysis	Xu et al. 2021	Systematic review	472 H&F	FFS : amplitude, pic d'impact et taux de charge inférieur à RFS. Raideur cheville, moment extension du genou, pouvoir excentrique du genou, travail négatif du genou et stress fémoro-patellaire plus faible qu'en RFS. FFS augmente moment flexion, la puissance excentrique et le travail négatif de la cheville.	Xu Y, Yuan P, Wang R, Wang D, Liu J, Zhou H. Effects of foot strike techniques on running biomechanics: a systematic review and meta-analysis. Sports Health. 2021 Jan-Feb;13(1):71–77. doi:10.1177/1941738120934715
Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners	D. Lieberman et al. 2010	Étude expérimentale comparative observationnelle en laboratoire (non randomisée, non interventionnelle) : 5 groupes	62 H&F	Pendant la majeure partie de l'évolution humaine, les coureurs couraient pieds nus ou avec des chaussures minimalistes, adoptant naturellement une attaque avant-pied ou médio-pied. Ces foulées génèrent des forces d'impact plus faibles que l'attaque talon facilitée par les chaussures modernes, ce qui pourrait réduire les risques de blessures	Lieberman DE, Venkadesan M, Werbel WA, Daoud AI, D'Andrea S, Davis IS, Mang'eni RO, Pitsiladis Y. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. Nature. 2010 Jan 28;463(7280):531–5. doi:10.1038/nature08723.
The Influence of Running Technique Modifications on Vertical Tibial Load Estimates: A Combined Experimental and Machine Learning Approach in the Context of Medial Tibial Stress Syndrome	Miners et al. 2025	Essai en laboratoire : prédiction via machine learning		Diminution de la charge verticale avec : une réduction de vitesse, une foulée plus courte, une augmentation de cadence, FFS. Confirme que vitesse, cadence, foulée, taille, poids, type de foulée influencent fortement les forces verticales d'impact.	Miners T, Witchalls J, Bousie JA, Radcliffe CR, Newman P. The Influence of Running Technique Modifications on Vertical Tibial Load Estimates: A Combined Experimental and Machine Learning Approach in the Context of Medial Tibial Stress Syndrome. Biomechanics. 2025;5(2):22. doi:10.3390/biomechanics5020022

ANNEXES – BLESSURES ET FACTEURS DE RISQUE

nom	auteur et date	type d'étude	Population	principaux résultats	limites
A consensus definition of running-related injury in recreational runners: a modified Delphi approach	Yamato et al. 2015	Consensus d'expert	38 experts internationaux	Douleur musculosquelettique des membres inférieurs liée à la course (à l'entraînement ou en compétition) entraînant une restriction ou un arrêt de la course (en termes de distance, de vitesse, de durée ou d'entraînement) pendant au moins 7 jours ou 3 séances d'entraînement prévues consécutives, ou nécessitant une consultation chez un médecin ou un autre professionnel de santé.	Coureur récréatif, peut-on étendre cette définition
A systematic review of running-related musculoskeletal injuries in runners	Kakouris et al. 2021	revue systématique	22823 H&F	Incidence/prévalence: tendinite d'Achille (10.3%/6.6%), MTS (9.4%/9.1%), SFP (6.3%/16.7%), fasciite plantaire (6.1%/7.9%), entorse (I=6%), STIT (P=8%). Les UM se blessent a priori autant que les non-UM	Hétérogénéité des études, définition blessure : douleurs ? temps ? --> variabilité des incidences ; durée de suivi parfois insuffisant (<3mois). Pas de données en fonction du kilométrage ou temps de course
The proportion of lower limb running injuries by gender, anatomical location and specific pathology	Francis et al. 2019	revue systématique	47 études incluses, H&F >800 aux marathoniens	Localisations des pathologies les + fréquentes tous sexes confondus/homme/femme : genou (28%/40%/31%), cheville/pied (26%/19%/26%), jambe (16%/16%/21%). Pathologies les + fréquentes : SPF 17%, T d'achille 10%, MTS 8%	Hétérogénéité des études, pas de standardisation dans les méthodes de collecte de données

ANNEXES – BLESSURES ET FACTEURS DE RISQUE

The relationship between lower-extremity stress fractures and the ground reaction force: a systematic review	A. A. Zadpoor et al. 2011	revue systématique et méta-analyse	13 études incluses	pas de lien significatif entre FRS et fracture de stress $p < 0,05$. Mais lien entre taux de charge de la FRS (taux moyen et instantané) et fracture de stress $p < 0,05$.	Les études analyses des coureurs ayant eu des # de stress : biais de sélection, adaptation de technique? Vitesse de course imposée, durée courte des mesures : fatigue non prise en compte, elle augmente la FRS ?
Acute changes in foot strike pattern and cadence affect running parameters associated with tibial stress fractures	Yong et al. 2018	essai interventionnel (modification pattern et cadence)	17 coureurs récréatifs	Passage à la FFS réduit 2 facteur de risque de MTS : taux de chargement moyen average vertical loading rate) et maximal (peak vertical loading rate), la cadence augmentée provoque une réduction de l'angle d'adduction maximal de la hanche (plus l'angle est élevé plus de contraintes sur le membre inférieur)	faible puissance, court terme, participants tous sain et tous avec RFS
Biomechanics associated with tibial stress fracture in runners: A systematic review and meta-analysis	Milner et al. 2023	revue systématique	14 études, 2 prospectives	Pas de différence significative des FRS entre le groupe témoin et groupe avec fracture de stress tibial. Dans le groupe # tibial, des élévations : angle adduction de la hanche, contrainte de traction antérieure tibiale, contrainte de compression postérieure maximale, accélération axiale maximale	les études sont faibles, souvent < 30 participants, rétrospective, hétérogénéité dans les protocoles, mesures, populations

ANNEXES – BLESSURES ET FACTEURS DE RISQUE

The Relationship Between Running Cadence and Stress Fractures in Competitive Distance Runners	Jason A. Richwall 2025	revue narrative		études observationnelles suggèrent : RFS, cadence faible : risque de # de stress. Ceci est confirmé par les études expérimentales : augmenter la cadence réduit la probabilité de # de stress tibial, diminue angle adduction de la hanche, réduit les forces globales sur la hanche et genou.	revue narrative sans méta analyse. étude complémentaire avec autre échantillon pour valider ces résultats et observer les effets des modifications de cadence
Prospective comparison of running injuries between shod and barefoot runners	Altman et al. 2015	etude prospective	1 groupe pied nu (n=107) et chaussé (n=94)	moins de blessures musculosquelettique pieds nus ($p<0,05$) mais rapporté au km pas de différence. Plus de blessures au mollet, moins au genou et à la hanche pieds nus. Fasciite plantaire moins fréquente pied nus.	moins de km pieds nus, réduit exposition au risque. Pas de randomisation des groupes ni ajustement pour l'age, imc, sexe ce qui influence le risque de blessure
Risk factors for running-related injuries: An umbrella systematic review	C. K. Correia et al. 2024	revue systématique de revue systématique	13 revues systématiques	facteurs de risques à effets importants retrouvés : caractéristiques des entraînements, santé et mode de vie, morphologie et biomécanique	études de faibles qualité selon score AMSTAR II
Biomechanical Risk Factors Associated with Running-Related Injuries	Ceyssens et al. 2019	revue systématique	13 études de bonne qualité +3 qualité modéré	adduction de la hanche serait un fdr de STIT, SFP uniquement chez la femme, non retrouvé en groupe mixte. Résultats sur taux de charge incohérent	pas de méta-analyse en raison de l'hétérogénéité
Foot Strike and Injury Rates in Endurance Runners	Daoud et al. 2012	enquête rétrospective	52 coureurs, 36 RFS, 16 FFS	modèle linéaire indique les covariables suivantes significativement associé à overuse injurie : RFS, femme, distance. RFS : 2x plus blessé que les FFS	retrospectif, échantillon faible, population spécifique, biais de rappel, et autodéclaration

ANNEXES – BLESSURES ET FACTEURS DE RISQUE

Landing Pattern Modification to Improve Patellofemoral Pain in Runners	Cheung et al. 2011	série de cas	3 F	GT de RFS vers FFS améliore le SFP chez les 3 cas avec le maintien du schéma d'attaque à 3 mois. Pic d'impact et taux de charge ont diminué	série de cas, pas de témoin/contrôle. Suivi sur 3 mois, uniquement des femmes
Risk Factors for Injuries in Runners : A Systematic Review of Foot Strike Technique and Its Classification at Impact	Burke et al, 2021	revue systématique	13 études	faibles preuve disant qu'il y a relation entre FSP. Mais 2/3 des études retrouvent un lien rétrospectif sur des échantillons petits et avec méthode fortement discutable : étude prospective nécessaire. 3 études retrouvent un taux de blessure inf en course FFS/MFS.	rétrospectivité, classification des FSP non standardisée, de meme pour les RRI, facteur de confusion non prise en compte : vitesse surface fatigue chaussure etc.
What are the Main Running-Related Musculoskeletal Injuries?	Dias Lopes et al. 2012	revue systématique	8 articles, 3500 coureurs	Blessures les plus fréquentes chez les UM : tendinopathie d'achille (p =2-18%) et SFP (P=7,4-15,6%) ; chez les non-UM : MTS (P=9%), tendinopathie d'Achille (P=6-9%) et fasciite plantaire (P=5-17%)	peu d'études incluses

ANNEXES – CHAUSSURES MINIMALISTES & TRANSITION VERS LES MFW

Titre	Auteurs et année	Type d'étude	études & Population	résultats	limites
Running shoes for preventing lower limb running injuries in adults.	Relph et al. 2022	systematic review with meta-analysis	n=11,240	pas de preuve d'efficacité de prescription de chaussure en fx du pied, taux de charge significativement lié au fractures de stress contrairement à la force d'impact	bcp de biais, hétérogénéité des définitions de blessures, des catégories de chaussure, populations récréatif/militaire (non généralisable), aveugle impossible, IC large, et p>0,05
The effects of minimalist shoes on plantar intrinsic foot muscle size and strength	Xu et al. 2023	revue systematique		augmentations significatives et des changements en pourcentage dans la force musculaire du pied, le volume, la surface transversale et l'épaisseur. La force a augmenté entre 9 et 57 %, et la taille entre 7,05 et 10,6 %.	
Effect of minimalist shoes on foot muscle morphology: systematic evaluation and Meta-analysis	Xiaotian B et al. 2024	revue systematique		Augmentation de circonférence l'abducteur de l'hallux SMD = 2 (conservé apres clipping/patching), pas d'effet sur flechisseur court des orteils	
The role of footwear in improving running economy	Xu et al 2025	systematic review with meta-analysis	n=483 ; 26 essais randomisés	Pieds nus et MFW meilleur que les CS, pas de dif entre pied nu et mfw, confort : aucun effet sur RE ;	pas d'aveugle (chaussures), test de 15 minutes donc effets a longs termes non quantifiables

ANNEXES – CHAUSSURES MINIMALISTES & TRANSITION VERS LES MFW

The effect of footwear on running performance and running economy in distance runners	J. T. Fuller et al. 2015	systematic review with meta-analysis	19 études incluses sur 1044 articles	MFW>CS (SMD=0,29 p<0,01), light shoes/barefoot>heavy shoes (SMD=0,34 p>0,01), relation cout métabolique et masse de la chaussure	limite majeur : aucun essai ne mesure la performance de course, meilleure RE = meilleure perf ? Effet faible ; 19/1000 généralisation ?
Improving running economy by transitioning to minimalist footwear	Lindlein et al. 2018	randomised controlled trial	32 H	effet non significatif et très léger mais train in MFW a permis une meilleure RE	
Eight weeks gait retraining in minimalist footwear has no effect on running economy	Warne et al. 2015	randomised controlled trial	23 H	RE meilleure avec MFW (2,72%) mais le GT inutile pour améliorer la RE ; cadence + 7,5/m en MFW	taille échantillon faible ; coureur confirmé
Kinematic and Kinetic Comparison of Running in Standard and Minimalist Shoes	Richard et al. 2014	étude expérimental en laboratoire : test CS puis MFW	14H	Si MFW imposé aux coureurs habitué en RFS augmentation taux de charge et pic d'impact	effet étudié sans habitude aux chaussures
Primitive running : analyse par enquête pour l'intérêt de la pratique	Rothschild, 2012	Enquête via questionnaire électronique : étude descriptive transversale	785 réponses sur 6082 contact	75% intéressés par la course minimaliste, 30% ont essayé les MFW, motivation principale : prévention blessure. Frein majeur : peur blessure	autodéclaration, 13% de participation : biais de sélection probable

ANNEXES – CHAUSSURES MINIMALISTES & TRANSITION VERS LES MFW

Running retraining to treat lower limb injuries: a mixed-methods study of current evidence synthesised with expert opinion	Barton et al. 2016	revue systématique + 16 avis d'expert internationaux	46 études biomécaniques	expert recommandent le GT malgré manque de preuve solide : STIT, fasciite plantaire, T d'Achille, douleur mollet, MTS, sd loge chronique antérieur	peu de preuve solide malgré abondance de données biomécaniques, recommandations d'expert et non basées sur essais contrôlés, pas de consensus
Transitioning to Minimal Footwear	Warne et al. 2017	revue systématique et recommandations	20 études incluses	légère amélioration de la RE dans 4 études, développement musculaire amélioré dans 5 études, taux de blessures augmenté en transition par rapport au CS mais non significatif. Recommandations : transition progressive avec programmes structurés tenant compte du temps, de la charge d'entraînement, du renforcement musculaire et de la rééducation à la foulée	Besoin de recherches supplémentaires avec groupes contrôlés prospectifs, standardisation de protocole de transition. $\phi=0,06$ donc ici dans le cadre de la transition, le type de chaussure ici MFW vs CS a très peu d'effet sur le taux de blessure

AUTEUR(E) : Nom : PACAUX

Prénom : Maxime

Date de soutenance : 23 juin 2025

Titre de la thèse : Bénéfices et risques de la course à pied avec chaussures minimalistes, une revue narrative de la littérature.

Thèse - Médecine - Lille – Promotion OSLER 2016

Cadre de classement : Médecine du sport

DES + FST/option : DES médecine générale

Mots-clés : course à pied, blessures, prévention, biomécanique, minimaliste

CONTEXTE : La course à pied est en plein essor mais s'accompagne d'un taux élevé de blessures malgré l'évolution des chaussures. Depuis le succès du livre Born to Run (2009) et l'article de D.Lieberman dans Nature (2010), la «course minimaliste suscite un engouement important. Elle est présentée comme plus « naturelle ». Pourtant, les bénéfices biomécaniques supposés restent controversés tout comme les risques (fractures de stress métatarsiennes, tendinopathies achilléennes), faute de consensus solide et de méthodologies solides.

METHODE : Revue narrative, choisie pour sa flexibilité afin d'intégrer des essais cliniques, études observationnelles, méta-analyses. Avec choix des articles les plus récents étayant ou nuancant les revues.

RESULTATS : La FFS se distingue par des pics d'impact et des taux de charge verticaux plus modestes que l'attaque talon, avec un déplacement des contraintes du genou vers la cheville et la jambe, ce qui favorise stockage puis restitution d'énergie élastique via le tendon d'Achille et le fascia plantaire. Les chaussures minimalistes induisent une cadence plus élevée, un temps de contact au sol plus court et des foulées raccourcies, améliorant de 1 à 3% l'économie de course. Les études montrent une incidence globale des blessures comparable entre chaussures minimalistes et modèles standard, mais la répartition change : on observe à moyen terme moins de syndromes fémoro-patellaires tandis qu'une transition trop rapide accroît transitoirement le risque de lésions métatarsiennes et de tendinopathies achilléennes. Une transition sur au moins 12 semaines limiterait les blessures d'adaptation. En l'état des preuves, on ne peut pas confirmer que le minimalisme diminue globalement les blessures liées à la course, mais la non-infériorité par rapport aux chaussures traditionnelles paraît fondée.

Conclusion : Ces données impliquent de ne plus conseiller d'emblée de chaussures amorties pour la course. Connaître le FSP du patient est important, pour autant il n'est pas conseiller de réaliser de transition si aucun problème n'est patent.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Vincent TIFFREAU (PU-PH)

Assesseurs :

Monsieur le Professeur Carlos MAYNOU (PU-PH)

Monsieur le Docteur Luc DAUCHET (MCU-PH)

Directeur de thèse : Monsieur le Docteur Vincent COUVREUR